

12
7/6
8/0
5/5
27063

Abschlußbericht

für das Schlickprojekt des Kuratoriums für
Forschung im Küsteningenieurwesen

Teilvorhaben

"Geochemische und elektronenmikroskopische
Untersuchungen der Schlickbildung im
Büsumer Watt"

Arbeitsgruppe

Prof. Dr. Egon T. Degens
Dr. Stephan Kempe
Geologisch-Paläontologisches Institut
Universität Hamburg
Bundesstraße 55
2000 Hamburg 13

Februar 1980

27063 - 1

Gliederung

Vorwort, Danksagung

A. Lage und Geologie des Untersuchungsgebietes

B. Methodik

1. Elektronenmikroskopie

1.1 Rasteraufnahmen

1.2 EDAX-Analytik

2. Anorganische Parameter

3. Organische Parameter

C. Ergebnisse

1. Sedimentuntersuchungen

1.1 Elektronenmikroskopie

1.2 EDAX-Analyse

1.3 Organische Bestandteile der Wattsedimente

2. Geochemie der Tiden

2.1 Einleitung

2.2 Die gelösten Stoffe

2.3 Die Suspension

D. Diskussion verschiedener Aspekte der Schlickbildung im Buismer Watt

E. Zusammenfassung

Literatur

Abbildungen

Fotos

Tabellen

Geochemische und Elektronenmikroskopische Untersuchungen der Schlickbildung im Büsumer Watt

Von: Stephan Kempe

Anschrift des Autors: Dr. Stephan Kempe

Geologisch-Paläontologisches Institut

Universität Hamburg

Bundesstraße 55

2000 Hamburg 13

Vorwort, Danksagung

Schlickbildung in Häfen und an Küstenbauwerken gehört zu den Hauptproblemen des Küsteningenieurwesens. In einem interdisziplinären zweijährigen Forschungsprogramm (1977-1979) versuchte das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), diesen Problemen näherzukommen. Das Programm wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Forschung und Technologie finanziert. Prof. Egon T. Degens vom Geologisch-Paläontologischen Institut der Universität Hamburg bekam den Auftrag für elektronenmikroskopische und geochemische Untersuchungen.

Die engen Kontakte zu den anderen an diesem Projekt beteiligten Arbeitsgruppen war für die Arbeit unabdingbar und inspirierend. Dies gilt insbesondere für die Arbeitsgruppen Dr. H. Thiel, Dipl.-Biol. M. Großmann und Dipl.-Biol. H. Spychalla vom Institut für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaften der Universität Hamburg, Prof. R. Köster und Dipl.-Geol. R. Gast vom Geologisch-Paläontologischen Institut

der Universität Kiel und Dipl.-Ing. P. Wieland und Dipl.-Ing. B. Fladung vom Amt für Land- und Wasserwirtschaft, Dezernat Gewässerkunde, Büsum. Die Geländearbeiten, die langwierigen Laborarbeiten sowie die Wartung des technischen Geräts hätte ohne die Hilfe der vielen Studenten vom Geologisch-Paläontologischen Institut nicht durchgeführt werden können. Nennen möchte ich A. Bockram, U. Campe, K. Emeis, V. Ittekkot, U. Lammerz, B. Mycke, K. D. Schrader, M. Seeger, R. Seifert und J. Vogt. Dr. Eberlein stellte seinen Autoanalysator für die Gesamtzucker-Analysen zur Verfügung, die I. König durchführte. Herr Reimers von der Baustelle Speicherkoog stellte uns das Schleusenhaus zur Verfügung. Herr Wünschmann vom Deutschen Hydrographischen Institut bestimmte die Salinitäten. Unser Laborleiter Dr. W. Michaelis sowie Dr. R. Schallreuter, für das Rasterelektronenmikroskop zuständig, und Prof. H. K. Wong haben mit Rat und Tat zur Seite gestanden. Frau D. Lewandowski hat die Zeichenarbeiten und Frau I. Jennerjahn die Schreifarbeiten übernommen.

Allen diesen Beteiligten und insbesondere dem Projektleiter Prof. E. T. Degens sei für ihre vielfältige Hilfe an dieser Stelle aufrichtig gedankt.

A. Lage und Geologie des Untersuchungsgebietes

Die Festlegung des Testgebietes in der nördlichen Meldorfer Bucht durch das KFKI (Abb. 1) gründete sich auf zwei Kriterien: 1. dem Vorkommen von Schlick-, Misch- und Sandwatt auf engem Raum und 2. der sehr guten Zugänglichkeit. Im nur

Abb. 1

2 km entfernten Dezernat für Gewässerkunde in Büsum (DGB) standen Übernachtungs-, Wasch- und Unterstellmöglichkeiten zur Verfügung. Ferner konnte hier der für das Programm angeschaffte, schwimmbare Ballonreifenwagen Solo stationiert und gewartet werden, der den Transport der eingesetzten Geräte im Watt erst möglich machte.

Im Gebiet nördlich des Priels Wöhrdener Loch wurden vom DGB zwei Profile ausgepflockt (Schnitt I und II, s. Abb. 1), die vom Deich bis zur ca. 1000 m entfernten Prielkante reichen. Die Profile wurden vom DGB mehrfach einnivelliert, um Erosion und Sedimentation zu quantifizieren. Auf Schnitt II wurde im Sommer 1978 außerdem eine kleine Meßplattform errichtet, die die von mir durchgeführten Untersuchungen wesentlich erleichterte.

Die Schnitte I und II führen lediglich deichseitig durch dünnmächtige und nur saisonal vorhandene Schlickflächen. Das flächenmäßig kleine eigentliche Schlickgebiet liegt zwischen den Schnitten und ist durch Zusedimentation eines Baggerloches entstanden. Es wird von einem Kranz von Schlicksand umgeben (Gast, 1980). Dieses Areal wurde von der Arbeitsgruppe Großmann und Spychalla in 100 m Abstand ausgepflockt und flächenmäßig auf Tierbestand und Sedimenttyp während 1978-1979 erfaßt (Großmann und Spychalla, 1980). Die Korngrößenverteilung auf den Schnitten in ihren zeitlichen Veränderungen wurden von R. Gast bearbeitet, der darüberhinaus 2 m-Peilstangen-Bohrungen vornahm. Er kartierte ferner die gesamte nördliche Meldorfer Bucht sedimentpetrographisch. Die Masse der angetroffenen Sedimente bildet der Wattsand (Gast, 1980).

Über die Tiefe des Wattsandkörpers informieren Bohrungen für den Bau des Dithmarscher Speicherkoogdeiches, die, zusammen mit Bohrungen des Hinterlandes der Meldorfer Bucht, von R. Schmidt (1976) ausgewertet wurden. Der Wattsandkörper ist im Dammbereich ca. 15 m mächtig und verdünnt sich zunehmend landwärts. Darunter liegt ein frühholozäner Marschenklei, der sich mit dem Anstieg des Meeresspiegels über dem Pleistozän (meist Sanden) abgelagert hat. Der Bereich der Meldorfer Bucht ist seit diesem Meeresspiegelanstieg nicht landfest gewesen.

Seewärts der Deichlinie geben flachseismische Tests von H. K. Wong und dem Verfasser vom 26.5.1979 erste Auskunft über den Aufbau des Wattkörpers. Getestet wurde ein ORE-Flachseismik-System, bestehend aus 4-Transducer-Array, Transceiver und EPC-Recorder. Gemessen wurde bei 2.0 kHz und mit einer Impulslänge von 0.2 msec.

Bei der Querung der Priele Kronenloch und Wöhrdener Loch konnte ein tiefer Reflektor bei 25 und 27 msec Laufzeit nachgewiesen werden (s. Abb. 2 und 3). Bei ca. 3 m pro 2.5 msec entspricht das einer Tiefe von ca. 21 und 22.5 m. Dieser Reflektor liegt also etwa gleich tief wie die Oberkante des Pleistozäns unter dem Speicherkoog Deich. Ein weiterer Reflektor fand sich unter beiden Prielen bei 18 bzw. 21 msec, entsprechend 15 und 17.5 m Tiefe. Er ist vermutlich mit der Oberkante des Kleis gleichzusetzen. Außerdem konnten Schrägschüttungen im holozänen Wattkörper aufgenommen werden, die

für das Kronenloch eine z. Z. anhaltende Erosion nach N, für das Wördener Loch eine schwache Erosion nach S wahrscheinlich machen.

Zwei Peilstangenbohrungen auf Schnitt II durchteuften Wattsande und schluffige Sande, um in 14 m Tiefe auf einer härteren Schicht steckenzubleiben. Vermutlich wurde also gerade die Oberkante des frühholozänen Marschenkleis erreicht.

Auch die Piep, der Hauptpriel westlich Büsum, wurde flachseismisch untersucht. Der S-Hang ist durch hangparallele Schichtung flachen und gleichmäßigen Einfallens als Gleithang charakterisiert. Am steileren Nordhang wird dagegen erodiert. In 12 m Tiefe findet sich dort eine deutliche Gefällekante, die von einem gut sichtbaren, waagerechten Reflektor unterlagert wird, möglicherweise wiederum die Kleioberkante. Direkt unter dem Prielboden in ca. 20-25 m Tiefe ist ein weiterer Reflektor deutlich, den man mit der Pleistozän-Oberkante korrelieren kann.

Diese Ergebnisse zeigen, daß 1. der aus den Speicherkoogbohrungen gewonnene Schichtbau des oberen Untergrundes sich weit in das Wattgebiet hinein verfolgen läßt und 2. daß in der Piep nicht nur Wattsande, sondern auch (vermutlich) der frühholozäne Klei erodiert werden und so als Quelle von siltigem und tonigem Material für die Wattgebiete der Meldorfer Bucht fungieren kann.

B. Methodik

1. Elektronenmikroskopie

1.1 Rasteraufnahmen

Die Betrachtung von Sediment- und Suspensionsproben unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) vermittelt einen optischen Eindruck der Probenmorphologie. Ca. 500 Proben wurden mit dem Stereoscan 180 der Firma Cambridge am Geologisch-Paläontologischen Institut untersucht. Die Präparation der Objekte für die REM-Untersuchung ist einfach. Sedimentproben werden mit dem Spatel im Watt in Transportdosen übertragen. Zur Bergung der die Oberfläche bildenden Partikel (Kotpillen, Diatomeenfelder) wurde die Lackfilmmethode angewandt, bei der ein Acetonlackgemisch auf die Oberfläche gesprüht wird. Nach dem Trocknen kann die Lackfolie mit anhängendem Sediment abgezogen werden. Für Suspensionsproben werden aus den Filtern ca. 0.5 cm^2 große Stücke herausgeschnitten.

Das Untersuchungsobjekt wird mit Doppelklebeband oder Leim auf einen Spezial-Aluminiumhalter von 1 cm Durchmesser geklebt. Dies kann zweckmäßig schon im Watt geschehen. Dann wird die Probe im ~~Exsikkator~~ getrocknet, mit Gold bedampft

und in die Säule des REM eingesetzt. Wegen des hohen Atomgewichtes von Au wird der auftreffende Kathodenstrahl besonders wenig gestreut, so daß eine hohe Bildauflösung zu erreichen ist. Bei einer Beschleunigungsspannung von 8 keV und optimaler Einstellung der Kondensatoren und aller Strahlparameter können

Vergrößerungen von 10 000-fach erreicht werden. Ein Sandkorn von 100 μm besitzt dann den scheinbaren Durchmesser von einem Meter.

Der Elektronenstrahl rastert die Probe zeilenweise ab, und der seitlich in der Sample Chamber sitzende Detektor fängt die rückgestreuten Elektronen ihm zugewandter Flächen auf. Nach der elektronischen Zusammensetzung der Signale zu einem Fernsehbild erscheinen diese Flächen hell, detektorabgewandte Flächen dagegen dunkel. Das Fernsehbild kann fotografiert werden, dazu wird die Rastergeschwindigkeit auf einen Durchlauf in 120 sec und die Zeilenzahl auf 2000 erhöht, so daß sehr scharfe Bilder entstehen.

Im Gegensatz zum Lichtmikroskop erlaubt das REM nur die Untersuchung der Oberfläche. Mineralidentifikationen sind nur nach Kornform, Flächenausbildung und Größe möglich und erfordern ganz andere Erfahrung als die der Lichtmikroskopie.

Der Zeitaufwand hängt weniger von der Vorbereitung der Probe, als vielmehr vom Detailreichtum und der Intensität der Beschäftigung mit der Probe ab. Einen schnellen Überblick kann man sich in ca. einer halben Stunde verschaffen.

1.2 EDAX-Analytik

Das an das REM des Geologisch-Paläontologischen Instituts angeschlossene EDAX-Gerät erweitert die Arbeitsmöglichkeiten der Elektronenmikroskopie erheblich.

In der Energy-Dispersive-Analysis-of-X-Rays (EDAX) werden die vom Elektronenstrahl angeregten und aus der Probe stammenden Röntgenstrahlen auf ihr Energiespektrum untersucht. Jedes Element strahlt in einem oder mehreren charakteristischen Energiebereichen Röntgenquanten ab. Die Quanten werden von einem zweiten Detektor in der Probenkammer des REM aufgefangen und im EDAX-Gerät deren Energiespektrum auf einem Schirm gezeigt. Dieses Spektrum wird von einem angeschlossenen NOVA II-Computer mit einem FRAME-Programm behandelt und in Elementprozentage bezogen auf die Gesamtsumme der analysierten Elemente umgerechnet. Da die Elemente sich durch Fluoreszenz gegenseitig anregen, ist das Rechenprogramm ziemlich aufwendig und kann nur 8 Elemente gleichzeitig berücksichtigen. Elemente mit einer Ordnungszahl unterhalb der von Na sieht der Detektor wegen ihrer geringen Energie nicht, sie können daher nicht analysiert werden. Hierunter fallen sedimentologisch so wichtige Elemente wie C, O und N. Da Gold einen starken Peak zwischen Si und S erzeugt, werden die Proben mit dem für den Detektor unsichtbaren Kohlenstoff bedampft. Die Auflösungsschärfe des REM-Bildes leidet etwas darunter. Um die leichten Elemente (Mg, Al, Si) gleichermaßen wie die schwereren (Mn, Fe, Cu ...) anregen zu können, wird bei einer Beschleunigungsspannung von 30 keV gearbeitet.

Die EDAX-Analyse leistet zweierlei: 1. kann man mit ihr Einzelkörner von unter 1 μm auf ihre Elementzusammensetzung analysieren (die Ergebnisse gelten mit bestimmten Einschränkungen, da Sekundärstreuung an Nachbarkörnern auftreten und

man außerdem den Winkel eines so kleinen Kornes zur Detektor-ebene nicht mehr bestimmen kann), und 2. kann man bei niedriger Vergrößerung die Zusammensetzung von Korngemischen pauschal bestimmen.

Die erste Möglichkeit läßt sich zur schnellen Identifikation eines Partikels heranziehen. Man läßt ein Spektrum auflaufen und sieht anhand der Dominanz von z.B. Si oder Ca, ob man es mit dem Bruchstück einer Diatomee oder einer Foraminifere zu tun hat. Sandkörner werden so in Quarz, Feldspäte, Calcit-schalenbruchstücke oder Schwerminerale unterschieden. Diese Arbeitsweise ist zeitaufwendig, und die Kenntnis der Natur der Einzelkomponenten führt nicht zu einer quantitativen Beschreibung des vorliegenden Sediments.

Diese quantitative Charakterisierung erhält man aber bei der Pauschalanalyse. Im Falle der Wattsedimente wurde bei 100-facher Vergrößerung 100 Sekunden bei einem Kippwinkel von 45° des Proben-tellers abgerastert. Diese geringe Vergrößerung erlaubt die Annahme, daß die Oberflächenwinkel aller Körner im Mittel 45° betragen und daß die Einzelkörner klein genug im Verhältnis zur betrachteten Fläche sind, so daß man Mittelwerte eines hinreichend großen Ensembles von Einzelkörnern erhält.

Der Vergleich mit den viel aufwendigeren naßchemischen Analysen ist schwierig, da die Erfahrung mit EDAX-Analysen in der Geologie noch sehr begrenzt ist. Analysen von Standardverbindungen bekannter chemischer Zusammensetzung zeigen, daß bei Elementen über 10 % am Gesamtanteil mit Fehlern unter 5 % des Wertes zu

rechnen ist, bei Elementen unter 10 % kann der Fehler höher sein. Bei natürlichen Vielkomponentengemischen kommt als Schwierigkeit hinzu, daß z. B. Tonminerale auf den Kornoberflächen von Sandkörnern kleben und so sehr viel höhere Si-Gehalte durch Al maskiert werden.

Die im Rahmen dieser Untersuchung gemachten Erfahrungen zeigen aber, daß die Analysen durchaus reproduzierbar sind und vor allem auch geologisch sinnvolle Interpretationen ermöglichen.

2. Anorganische Parameter

Die Salinität wurde konduktometrisch bestimmt. Die Berechnung erfolgt gegen 35 ‰ Standardseewasser. Die titrimetrische Bestimmung der Chlorinität und anschließende Berechnung der Salinität (Sverdrup et al., 1942) führte zu unterschiedlichen Ergebnissen. Dies ist bei den niedrigen (brackischen) Salinitäten in der Meldorfer Bucht nicht verwunderlich, da durch Zumischung von Elbwasser die einzelnen Komponenten des Seewassers nicht nur einfach verdünnt werden, sondern auch in ihren Ionenverhältnissen verschoben sind. Beide Bestimmungsmethoden können daher nur auf Standardseewasser bezogen Modell-salinitäten ergeben.

Da in diesem Zusammenhang aber nur Salinitätsänderungen und weniger die absolute Höhe untersucht werden sollten, spielt diese definitorische Unsicherheit keine Rolle.

Der pH-Wert und das Redox-Potential (als Eh) wurden sofort nach der Probennahme mit einem Portamess 902 (Knick, Berlin) mit Temperaturkompensation und Ingold pH-Redox-Einstabmeßkette (PT-405-85, Ag/AgCl) gemessen. Die Eichung erfolgte vor der Meßreihe mit an die Meßtemperatur angepaßten Puffern pH 7 (Merck, Puffertitrisol 9887) und pH 9 (Merck, Puffer-titrisol 9889). Der Meßfehler des Gerätes ist mit <0.02 pH angegeben, die relative Genauigkeit innerhalb einer einheitlichen Meßserie dürfte bei ± 0.01 liegen. Der Redoxpuffer von Ingold (9881) wurde zur Eichung der Eh-Messung benutzt, die auf die Wasserstoffhalbzelle (gemessener Wert + 207 mV, Khoo, 1978) bezogen ist.

Der Sauerstoffgehalt wurde nach Fixierung im Gelände mit je 2 ml kaliumjodidhaltiger NaOH und $MnCl_2$ -Lösung 24 h später nach Winkler titrimetrisch bestimmt (Merck, 1974). Mehrfachbestimmung einer Probe ergab einen Fehler von 0,25 % (Standardabweichung in Prozent des Mittelwertes von 7 Bestimmungen).

Die Alkalinität wurde sofort nach der Probennahme mit 0,1 n HCl gegen Phenolphthalin (m -Wert) und Methylorange als Indikatoren (p -Wert) titriert. Alle Proben (je 20 ml) wurden doppelt bestimmt (Merck, 1974).

Ca und Mg wurden mit der Atomabsorption analysiert. In den Wasserproben (100 μ l auf 10 ml verdünnt) wurde nur Ca, in der von den Filtern abgeschabten Suspension wurden Ca und Mg bestimmt. Als Puffer diente $LaCl_3$. Die Berechnung erfolgte durch Regressionsanalysen an einer Standardserie. 8-fache

Bestimmung der gleichen Probe ergab einen ^{relativen} Fehler von 0,76 %. Bei den beiden Wasserserien vom 21.9. und 19.10.1978 betrug er dagegen 1.03 bzw. 2.05 %, lag also oberhalb des Analysenfehlers.

Die Wasserproben für die weiteren Analysen wurden durch 0,2 μ Sartorius-Membranfilter (Zelluloseacetat) mit Unterdruck filtriert und nach Volumenmessung mit 1 ml gesättigter HgCl_2 Lösung vergiftet. Die Filter, vor Benutzung getrocknet und gewogen, wurden bei 50°C getrocknet und zur Bestimmung des Suspensionsgehaltes erneut gewogen. Auf ein Auswaschen des Salzes wurde verzichtet, um das Material nicht von der Filteroberfläche abzuschwemmen, bzw. es zu verändern. Die Suspensionsgewichte beinhalten daher einen unkorrigierten Hintergrund durch Salz.

1-3 mg Suspension wurde in gesäuberten (Aceton, Petrolbenzin) Ag-Kartuschen mit der Mikrowaage eingewogen. In einem Reagenzglas wurden 1 ml 25 % HCl zugegeben und die Lösung mit einer Filterspritze (Whatman GF/C) gefiltert. Glas und Filter wurden dreimal mit Bidest gespült und Lösung, Spülwasser und 2 ml LaCl_3 -Lösung auf 20 ml aufgefüllt. Die Ca-Konzentration liegt dann im Linearbereich der Ca-Absorption. Für die Mg-Bestimmung wurde noch einmal fünfmal verdünnt. Die Blindwerte dieses Aufbereitungsvorganges (für Ca 3,5 mal höher als der Blindwert des Bidest-Wassers der Standardreihe, für Mg 1,4 mal höher) wurden bei der Berechnung der Ca- und Mg-Gehalte der Suspension berücksichtigt.

Die Phosphatanalyse erfolgte photometrisch mit Vanadat-Molybdat Reagenzlösung gegen Standards. Die Genauigkeit der Analysen

ist aufgrund von Gerätefehlern nicht zu ermitteln. Aus der Varianz in den Meßreihen können daher kaum Schlüsse gezogen werden.

3. Organische Parameter

Die Bestimmung des gelösten Kohlenstoffs erfolgte mit dem Total Carbon Monitor 400 P von Carlo Erba. Die Probe sowie 2-3 %ige HNO_3 wurden kontinuierlich angesaugt und gemischt. Die Gasphase wird von der fluiden abgetrennt und in 2 Aliquots geteilt. Ein Teil wird direkt in den Flammenionisationsdetektor (FID) geleitet. Der Peak repräsentiert den flüchtigen organischen Kohlenstoff. Das zweite Aliquot wird auf Ni-Katalysator bei 400°C methanisiert und dann in den FID geleitet. Der Ausschlag repräsentiert den gelösten anorganischen Kohlenstoff (DIC) plus den flüchtigen C_{org} . Die fluide Phase wird bei 920°C auf CuO im N_2 -Strom oxidiert, in einer Silicagelsäule getrocknet, methanisiert und im FID gemessen. Der Peak entspricht dem gelösten organischen Kohlenstoff (DOC). Gemessen wird gegen Oxalsäurestandard (DOC) und NaHCO_3 (DIC).

Die Genauigkeit der Analyse wird vor allem durch Haftung von Restmengen der zuvor analysierten Probe im Monitor bestimmt. Aus diesem Grund wird die Analyse dreimal wiederholt und der erste Peak verworfen. Liegen die Probenkonzentrationen nahe zusammen, ist die Genauigkeit höher als bei großen Differenzen zwischen den Proben. Dieses Geräteverhalten verbietet (aus Zeitgründen) die Verwendung von mehr als 3 Standards. Bei der DOC-Bestimmung muß zudem ein hoher Hintergrund im Verdünnungs-

wasser der Standards berücksichtigt werden. Es ist außerordentlich schwierig, bidestilliertes Wasser mit weniger als 1-2 mg C_{org}/l herzustellen. Die Ergebnisse erscheinen daher auf 2 signifikante Stellen gerundet.

Die titrimetrische Bestimmung der Alkalinität erlaubt eine gewisse Kontrolle der DIC-Werte, rechnet man sie auf Kohlenstoff um. Da die Alkalinität des Meerwassers Hydroxy- und Borat-Ionen einschließt, muß der aus ihr berechnete C-Gehalt konstant höher liegen. Dies trifft für die vorliegenden Ergebnisse zu.

Die Gesamtzucker und der Nitratgehalt im Wasser wurden mit einer von Eberlein und Hammer (1979) entwickelten Methode bestimmt. Grundlage der Analyse ist die L-Tryptophan-Schwefelsäure-Reaktion und ein Technicon Auto-Analyzer. Der NO₃-Gehalt wird in einem Kaltlauf (0° C) separat bestimmt und vom Peak des Warmlaufs (100° C; Zucker plus Nitrat) subtrahiert. Der Bereich der Bestimmungen wird mit 0,02-5 mg Kohlenhydrate pro Liter angegeben. Bei 1 mg Glucose pro Liter wurde die Genauigkeit von 0,25 % bestimmt. Mono- und Polysaccharide werden gleichermaßen gut erfaßt.

Für die Bestimmung der Zuckerspektren im Sediment werden 1 g Substanz eingewogen mit 1,8 n HCl 4 h hydrolysiert und in der Dialysezelle entsalzt. Die Zucker im Wasser wurden an 50 ml bestimmt, die zunächst dialysiert, dann 3 h mit 1,8 n HCl hydrolysiert und anschließend nochmal dialysiert wurden. Diese ^{salzfreien} Ausgangslösungen wurden im Rotationsverdampfer zur Trockenheit

eingeeengt und mit Puffer aufgenommen. Zur Trennung der Zucker wurde ein Biotronik-Autoanalysator mit boratgepufferter Dowex DAX-8-20 Harzsäule verwendet. Als Indikator diente der stark gepufferte Bichinonin-Säure Na-Salz/Cu-Asparaginsäure-Komplex (Mopper, 1977). Die Bestimmung erfolgt photometrisch mit automatischer Peakintegration gegen ein 12-Zucker-Standardgemisch.

Die im Wassergelösten freien Aminosäuren (FAS, monomere und freie Enden polymerer Proteine) müssen innerhalb von 15-30 min nach Probennahme analysiert werden, andernfalls setzen mikrobielle Reaktionen ein, die die Werte verschieben. Versuche, FAS zu konservieren, schlugen bisher fehl. Zur Analyse diente ein Autoanalysator mit Probenaufgeber, Peristaltikpumpe und Gibson-Fluorometer. Die Probe wird ohne Entsalzung eingegeben, in der Maschine mit Boratpuffer 9.2 pH vereinigt und mit dem Indikator O-Phtaldialdehyd umgesetzt (Dawson u. Pritchard, 1978). Berechnet wird gegen einen 5 AS Standard mit den wichtigsten FAS des Seewassers. Jede Probe wurde 3-fach bestimmt, wobei auf äußerste Sauberkeit zu achten ist. Der Zeitaufwand für eine Probe beträgt ca. 15 min. Die Genauigkeit ist wegen der hohen Verschmutzungsgefahr etwa $\pm 20\%$.

Für die Bestimmung der Kohlenwasserstoffe ($C_n H_{n+2}$) wurde die Probe mit Benzol ausgeschüttelt, über Na_2SO_4 getrocknet und in einen Hewlett-Packard 5710A Gaschromatographen (GC) mit Apiezon-L belegter 25 m Glaskapillare eingegeben.

Zur Abtrennung der gesättigten $C_n H_{n+2}$ wurde über einer Dünnschichtplatte mit $AgNO_3$ eluiert und anschließend im GC getrennt.

C. Ergebnisse

1. Sedimentuntersuchungen

1.1 Elektronenmikroskopie

Elektronenmikroskopische Untersuchungen komplexer Sedimente haben den Nachteil, Bildmaterial und visuelle Erfahrungen in einem Umfang zu produzieren, der nicht veröffentlichbar ist. EM-Ergebnisse sind daher immer nur exemplarisch und in subjektiver Kondensation des Wesentlichen von Hunderten von Bildern und Eindrücken darstellbar. Eigenschaften und Zusammensetzung (partikuläre und chemische) der Wattsedimente seien an einer Beprobung von Schnitt I vom 21.6.1979 erläutert. Der Schnitt führt vom Deichfuß (s. Abb.1), wo im Juni ca. 10-20 cm Schlick lagen, über einen kleinen Nebenpriel mit deichwärtiger verschlickter Gleithangfläche, über ein festes Watt-sandplateau zum wiederum stärker verschlickten Ufer des Wöhrdener Lochs. Das DGB-Nivellement dieses Schnittes ist in Abb. 4 unten dargestellt.

Abb. 4

Diese Änderung des Korngrößenspektrums entlang dem Profil ist unter dem REM ganz eindeutig zu verfolgen. Deichwärtig ist der Anteil der Schluff- und Tonfraktion erheblich höher als Fotos 1, 2 auf dem festen Plateau in der Profilmitte. Die Fotos 1 und 2 zeigen Übersichtsaufnahmen typischer Proben schlickreichen und schlickarmen Sediments (Pr. 1, 100 m und Pr. 13, 700 m).

Die feine Fraktion verteilt sich entweder (i) mehr oder weniger gleichmäßig über die Oberfläche der Sandkörner, (ii) sammelt sich in den Kornzwickeln oder (iii) ist zu Agglomeraten zusammen-

Fotos 3, 5 gebacken. Die Fotos 3-5 erläutern diese drei Vorkommen. Die Agglomerate sind mit großer Sicherheit in allen Fällen zerfallende Kotpillen, die im frischen Zustand sehr kompakt erscheinen (Foto Nr. 6) und daher transportfähig sind und sich nur langsam auflösen. Bei den REM-Untersuchungen wurde keine Kotpille gefunden, die Körner der Sandfraktion enthielt. Die Kotpillenbildner sortieren also bei der Nahrungsaufnahme und nehmen nur die mit organischen Bestandteilen hoch belasteten Nicht-Quarz-Partikel des Wattsediments auf.

Auf Grund der Morphologie der Partikel und mit Hilfe der Elementspektren der EDAX-Untersuchung können die im EM sichtbaren Partikel der Sand-, Silt- und (beschränkt auf die größeren Partikel um 2 my) Tonfraktion grob klassifiziert werden:

Sandfraktion > 63 my	Siltfraktion 63-2 my	Tonfraktion unter 2 my
Hauptmasse: Quarzkörner	Hauptmasse: Tonminerale, Zellmembranen von Dia- tomeen (SiO ₂) und Grün- algen (C), Kotpillen- bruchstücke	Hauptmasse: Tonminerale und Zellmembranreste von Diatomeen und Grünalgen
häufig: Bruchstücke von Kalkschalern: Bivalvia, Gastro- poda, Echinoderma Komplette juvenile Bivalvia, Gastro- poda Kotpillen Schwerminerale Foraminiferen	häufig: Kleine Bruchstücke von Kalkschalern, kaum näher identifizierbar Foraminiferenbruch- stücke gelegentlich Quarz- körner der Grobsilt- fraktion Coccolithen (Feinsilt)	Nach dem Eintrocknen: Salzkristalle, amorphe org. Sub- stanz
Beispiel: Fotos 7, 8, 9	Beispiel: Foto Nr. 8	Beispiel: Foto Nr. 9

Es zeigt sich, daß die Silt- und Tonfraktion in der Hauptmasse aus plattigen Partikeln besteht, die auf jegliche mechanische Belastung mit Bruch reagieren. Korngrößenanalysen solcher Partikel liefern um so mehr Feinsilt und Tonpartikel, je höher die Aufarbeitungsenergie ist. Auch Kotpillen, die, so lange

sie frisch sind, eindeutig als ein homogenes Partikel anzusprechen sind, geben durch Zerstörung bei der Ultraschallbehandlung ein verfälschtes Bild des natürlich vorliegenden Korngrößenspektrums.

Korngrenzen zwischen sehr kleinen Partikeln lassen sich in der Regel auch bei hoher Vergrößerung nicht mehr eindeutig erkennen. Die Partikel scheinen ineinander überzugehen, ohne daß eine eindeutige Grenzlinie sichtbar würde, wie sie z.B. die Grenzen zwischen den Quarzkörnern eines sauberen Sandes kennzeichnen würde. Diese Eigenschaft geht offenbar auf die im Schlick vorhandenen organischen Substanzen zurück, die wie eine Klebmasse alle kleinen Hohlräume ausfüllt und sich wie eine Folie versiegelnd über die Partikelgrenzen legt. Gelegentlich wird diese "Klebmasse" in Form von Fäden oder Brücken zwischen Körnern sichtbar (Foto Nr. 10).

Foto 10

Diese organische Substanz trägt wesentlich zur Konsolidierung des Schlicks bei, der eben nicht als Ansammlung feiner Partikel zu beschreiben ist, sondern eine in sich mehr oder weniger stark vernetzte Substanz verschiedener Komponenten ist.

Aus den genannten Gründen gelingt es daher auch mit dem REM nicht, den Schlick durch Korngrößenspektren zu beschreiben. Die Vermessung von tausenden von Einzelkörnern verbietet sich nicht nur aus Zeitgründen, sondern auch deshalb, weil die Körner nur durch starke mechanische und chemische Eingriffe voneinander zu trennen sind. Der für das Wattsediment charakteristische Zusammenhalt ist dann zerstört, und wir untersuchen eben kein Wattsediment mehr. Die gleichen Einschränkungen gelten auch für den Versuch,

die mengenmäßige Verteilung von z.B. Tonmineralen, Diatomeenmatrizen und Kohlenstoffzellmembranresten festzulegen, eine zur Charakterisierung von Schlickern interessante Ratio.

1.2. EDAX-Analysen

Die EDAX-Analyse des Gesamtsediments erlaubt allerdings erste Schlüsse in dieser Richtung. In Tab. 1 sind die EDAX-Ergebnisse für die Beprobung von Schnitt I vom 21.6.1978 wiedergegeben. In Abb. 4 sind zudem Al und Ca und die bei der Probennahme in den oberen cm des Sediments gemessenen pH- und Eh-Werte dargestellt.

Auf den Schlickflächen steigt der Al-, Fe- und Ca-Gehalt deutlich an, während pH- und Eh-Wert deutlich abnehmen. Dieser Befund überrascht nicht, da ein Zurückgehen des Quarzanteils die anderen Elemente prozentual stärker betont. Die Probe direkt am Deichfuß hat entgegen diesem Trend vergleichsweise geringe Al-Werte. Offenbar ist hier der Schlick besonders reich an Diatomeenbruchstücken. Leider sagt natürlich der Quotient von Al zu Si nichts Absolutes über das Diatomeen/Tonmineral-Verhältnis aus, denn Si ist ja auch im Quarz und in den Tonmineralen selbst enthalten. Lediglich die Tatsache, daß makroskopisch Schlick vorliegt, das Sediment also sandarm ist, läßt aus dem hohen Si-Gehalt auf Diatomeen schließen.

Vergleicht man nun die sandigen Schlicke vom Ufer des Wöhrdener Lochs in ihrer Zusammensetzung mit denen am Deichfuß, so fällt der höhere Ca-Gehalt am Wöhrdener Loch ins Auge. Offenbar ist in

der Nähe des schnell strömenden Wassers der Anteil an Kalkschalenbruchstücken besonders hoch.

Tab. 2

In Tab. 2 ist die Korrelationsmatrize für Tab. 1, der Vergleich der Elemente untereinander gegeben. Die höchsten Korrelationen weist das Si auf, als Hauptelement ist es negativ mit allen anderen korreliert, am höchsten mit Al. Die Zunahme des Si (sprich des Sandanteiles) läßt die prozentualen Gehalte aller anderen Elemente zurückgehen. Die niedrigste Korrelation des Si wird für die Elemente Mg und S gefunden, sie repräsentieren die Salze des verdunsteten Meerwassers. Dies bestätigt sich dann bei der Betrachtung der Koeffizienten für Mg und S, die untereinander sehr hoch positiv korrelieren, nicht aber mit den anderen Elementen. Wichtig ist auch das Al, das, wie erwähnt, mit dem Si hoch negativ korreliert, mit Ti, K und Fe aber hoch positiv. Das Kalium ist also eindeutig den Tonmineralen zuzuordnen und entstammt nicht etwa ausgefallenen Meerwassersalzen. Mineralogisch ist Illit als Kaliumträger und Haupttonmineral zu vermuten. Die hohe Variabilität des Kaliums (Tab. 1), mit einer Standardabweichung von 52 % gegenüber nur 20 % beim Al zeigt darüber hinaus, daß Illit nicht das einzige Tonmineral ist. Der verhältnismäßig hohe Eisengehalt und die hohe Korrelation von Fe mit Al deuten auf das Vorhandensein von Chlorit, Glaukonit oder Vermiculit. Fe und K korrelieren nicht positiv miteinander, was auf die wechselnde Zusammensetzung zwischen Illiten und Chloriten entlang dem Profil schließen läßt; an Suspensionen durchgeführte röntgenographische Untersuchungen zeigen dann auch das Vorhandensein von Kaolinit, Illit und einem 14 Å Mineral nebeneinander

(wie z.B. Chlorit). Ca und Al korrelieren zwar positiv, nicht aber signifikant (hier: Signifikanz = 90 %). Ca tritt in den Karbonaten auf, deren Vorkommen nicht an das der Tonminerale gebunden ist.

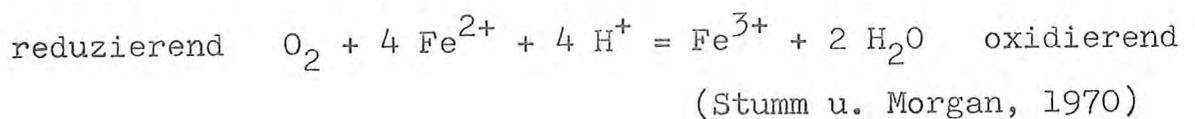
Die zum Teil hohen Eisenkonzentrationen sind sicher nicht nur auf die Tonminerale zurückzuführen, sondern auch auf Eisenoxidhydrate. Pyrit oder andere Eisensulfide scheinen dagegen an der Sedimentoberfläche noch nicht gebildet worden zu sein, jedenfalls findet sich zwischen Fe und S keine signifikante Korrelation.

Der pH-Wert (Abb. 4) ist überall schon in der obersten Sedimentschicht niedriger als der des Meerwassers (s. auch spätere Kapitel), er zeugt somit von der Wirksamkeit der Sedimentoberfläche als geochemische Grenze und von der hohen mikrobiellen Aktivität der Wattsedimente (Produktion von CO_2 durch Zersetzung org. Substanz und daraus resultierende Erniedrigung des pH-Wertes). Entsprechend dieser mikrobiellen Aktivität ist auch das Redoxpotential gegenüber dem freien Wasser reduziert, an den schlammreichen Stellen können schon in den oberen zwei Zentimetern negative Werte erreicht werden (Tab. 1). In den stärker mit dem freien Wasser austauschenden Sanden sind dagegen Werte bis über 200 mV festzustellen.

Der Zusammenhang zwischen Austauschbarkeit des Porenwassers, Schlickanteil und pH-Wert wird durch die Korrelationskoeffizienten des pH-Wertes mit den Elementen deutlich. Bis auf Si besitzen alle Elemente eine negative Korrelation (Tab. 2). Steigen diese

"Schlickbildner" in ihrem relativen Gehalt an, sinkt der pH-Wert zu saureren Werten. Die höchste negative Korrelation findet sich interessanterweise zum Eisen, mit dem auch der Eh-Wert am höchsten negativ korreliert, während alle anderen Korrelationen positiv oder nahe Null sind. Bedeutend ist ferner die Tatsache, daß Eh und pH miteinander hoch, d.h. sogar auf dem 90 % Level signifikant miteinander korrelieren.

Eisen ist die Komponente, die neben dem freien Sauerstoff und den organischen Substanzen durch die Redox-Reaktion



die Höhe des Potentials in natürlichen Systemen bestimmt. Die Bildung von Fe^{2+} -Ionen erfolgt unter Freisetzung von H^+ , Redoxpotential und pH müssen sich also in solchen Systemen gleichsinnig ändern. Für die Wattsedimente bedeutet dies, daß offenbar das Vorkommen von Eisen (zunächst in Oxidform) das Abgleiten des sedimentären Milieus in reduzierende Bedingungen in viel stärkerem Maße begünstigt als das Vorkommen von Tonmineralen und Diatomeenresten.

Tab. 3 Tab. 3 gibt eine zweite Element-Korrelationsmatrize, die der Aufnahme vom 4.7.1969 parallel zum Profil Arensch im Saalenburger Watt bei Cuxhaven. Die für Büsum gezeigten Zusammenhänge zwischen den Elementen gelten mit wenigen Ausnahmen auch hier, Si korreliert signifikant mit fast allen anderen Elementen negativ, Al korreliert sehr hoch positiv mit K und Fe und signifikant mit Ca.

Mg und S korrelieren wiederum hoch miteinander, entstammen also den Meersalzen. Im Gegensatz zu Büsum korreliert Mg aber auch mit Ca, was durch die Anwesenheit von Mg-Ca-Karbonaten erklärt werden könnte. K korreliert in Cuxhaven mit Al und Fe signifikant. Ti zeigt zu keinem anderen Element eine signifikante Beziehung, Ti war aber in Büsum mit Al signifikant positiv und mit Si signifikant negativ korreliert.

Am interessantesten sind aber die Verhältnisse des pH- und des Eh-Wertes zu den Elementen: Wie in Büsum korreliert der pH-Wert negativ mit Al und Fe, sinkt also bei höheren Gehalten der Tonfraktion. Der entsprechende Wert in Bezug auf das Si ist nahe Null, und nur zum Ca zeigt sich ein nennenswerter positiver Wert. Mit dem Eh-Wert korreliert der pH in Cuxhaven überhaupt nicht. Bei den Eh-Werten fällt die signifikante negative Korrelation mit dem Si und die signifikante positive Korrelation mit dem Ca ins Auge. Auch Al, K und Fe sind deutlich positiv korreliert. Eisen und die Tonmineralfraktion sind hier also nicht bestimmend für die Änderungen des Redox-Potentials, im Gegenteil sind die Si-reicheren Sedimente die mit dem niedrigsten Potential. Betrachtet man die REM-Aufnahmen, so wird man sich der starken Population der Sandkörner und vor allem der Kotpillen mit benthischen Diatomeen bewußt, die möglicherweise durch ihre Aktivität nicht nur den Siliciumgehalt, sondern auch den Oxidationslevel der Wattoberfläche bestimmen. In diesem Zusammenhang ist besonders wichtig, daß die absolute Höhe des Eh in Cuxhaven (Tab. 4) deutlich höher ist als in Büsum, die Eisenoxide also auch noch gar nicht in das Redox-Gleichgewicht

Tab. 4

eingreifen können und nur aerobe Respiration für die Höhe des Eh-Wertes von Bedeutung sein kann (Stumm und Morgan, 1970).

In Tab. 4 sind die Mittelwerte der EDAX-Zusammensetzung von vier verschiedenen Profilaufnahmen zusammengestellt. Alle vier Aufnahmen, drei aus Büsum, eine aus dem Saalenburger Watt bei Cuxhaven, unterscheiden sich nicht grundsätzlich in ihrer Zusammensetzung, wie ja auch schon die Elementkorrelationen sehr ähnlich ausfielen. Zwischen den beiden Beprobungen des Profils I Büsum im März und im Juni ist der Si-Gehalt von im Mittel 76.5 % auf 71.4 % zurückgegangen. Dies muß, betrachtet man die Standardabweichungen, nicht statistisch signifikant sein,

deckt sich aber mit den Geländebefunden: es hatte sich nämlich im Frühjahr und Sommer 1979 eine dünne Schlickschicht über Teile des Profils gelegt, die den Si-Gehalt quasi zurückdrängt. Interessanterweise geht die Abnahme des Si aber nicht auf eine Zunahme des Al zurück, sondern auf eine (signifikante) Zunahme des Eisens und eine geringe Zunahme des Calciumgehaltes. Vertrauen in die Realität dieser Werte bringen die konstant bleibenden Gehalte für die Elemente Magnesium und Schwefel, die aus den Salzen des Meerwassers stammen und sich zwischen den Probennahmen nicht hätten ändern dürfen, was die Tab. 4 auch glänzend bestätigt!

Die Büsumer Profile unterscheiden sich zu dem Cuxhavener Profil durch eben die drei Elemente Si, Ca und Fe. Si ist in Cuxhaven niedriger, dafür fand sich dort mehr Fe und Ca! Aus diesem Tat-

bestand weitreichende Schlüsse auf die jahreszeitlichen oder geographischen (Einfluß der Elbe in Cuxhaven stärker als in Büsum?) Faktoren der Wattsedimentgenese zu ziehen, verbietet sich wegen der zu geringen Datenmenge. Immerhin zeigen die hier vorgestellten Beispiele, daß die EDAX-Methode die vergleichsweise schnelle Vollanalyse von Sedimenten erlaubt und so die Verfolgung von geochemisch-mineralogischen Änderungen in Raum und Zeit in Zukunft möglich machen wird.

1.3 Organische Bestandteile des Wattsediments

Der Gehalt an organischer Substanz, die nach den elektronenmikroskopischen Untersuchungen eine bedeutende Rolle für die Konsistenz der feinkörnigen Wattsedimente spielt, liegt im Prozentbereich. Tab. 5 zeigt die Verteilung des organischen Kohlenstoffs auf Schnitt II in Büsum am 16.12.1977. Schlicke haben einen höheren Bestandteil als Sande (Reineck, 1970; Köster, 1979). C_{org} -Gehalte von 5 % sind in Schlickten häufig, was einem Gehalt an organischen Substanzen (berechnet als CH_2O) von über 10 % entspricht.

Die drei Proben in Tab. 5, bei denen die Gehalte an organischer Substanz hoch genug waren, um auch den Stickstoffgehalt zu messen, ergeben C/N-Verhältnisse um 14. Dies ist für das marine Milieu recht hoch. Natürliche Proteine (einschließlich der Aminosucker) in Sedimenten und im Plankton besitzen C/N-Quotienten von ca. 3.2 (Kempe, 1977). Je nach Proteingehalt hat marines Plankton ein C/N-Verhältnis von etwa 6 (Müller, 1977).

Müller hat gezeigt, daß mit der Abnahme des C_{org} im Verhältnis zum Aluminiumanteil auch das C/N-Verhältnis kleiner wird, was er auf den zunehmenden Einschluß einer kleinen Menge von mikrobiell nicht mehr verwertbaren Stickstoffverbindungen in Tonmineralen zurückführt. Selbst im Shelfbereich steigen die C/N-Werte der marinen Sedimente selten über 10 (Müller, 1977). Landpflanzen enthalten weniger als 20 % Proteine und haben entsprechend höhere C/N-Verhältnisse zwischen 14 und 30. Süßwassersedimente haben daher wesentlich höhere C/N-Werte, in Alster-Schlickten wurden z.B. 14.4, im Torf der Alster 15.3 gemessen (Michaelis et al., 1976). Die Suspension der Elbe, potentieller Lieferant auch für einen Teil der organischen Substanz der Wattsedimente, zeigt aber erstaunlich niedrige C/N-Werte: Wirth (1980) bestimmte als Mittel von 12 Proben zwischen Schnackenburg und Teufelsbrück im März 1977 7.1 und im Juli 1977 7.9. Das in Suspension befindliche organische Material der Elbe ist strukturlos (Wirth, 1980) und besteht nicht aus zellulosereichen Bruchstücken terrigener Pflanzen, wie man vielleicht erwarten könnte.

Bereits die Elbe liefert also weitgehend zu "Huminstoffen" abgebaute organische Substanz (ca. 20 % des Schwebstoffs sind C_{org} ; Wirth, 1980) mit einer C/N-Zahl nahe der des marinen Planktons.

Die hohen C/N-Werte im Büsumer Watt dürfen nicht als Anzeichen terrigener Pflanzensubstanz interpretiert werden, dazu sind, wie im Folgenden gezeigt, die Zuckergehalte zu niedrig. Es scheint sich vielmehr um stark abgebautes und aller mikrobiell verwertbarer Stickstoffverbindungen beraubtes Material zu handeln.

Nimmt man an, der gesamte Stickstoff sei an Proteine gebunden (unter Vernachlässigung der Amine, des Harnstoffs und anderer komplexer Verbindungsklassen), so wären maximal 20-25 % der organischen Substanz Proteine (bei $C/N = 3.2$), bzw. maximal 40 % könnten (ohne weitere Zersetzung) aus marinem Plankton oder Elbe-Suspension stammen (bei $C/N = 6$ und unter der Annahme, daß das restliche Material keinen Stickstoff enthält).

Die molekulare Struktur der organischen Substanz in Sedimenten und im Wasser gehört zu den bestgehüteten Geheimnissen der Natur. Einen Überblick über den Stand der Kenntnisse mit einer ausführlichen Bibliographie geben Mopper und Degens (1979). Analytisch sind nur solche Stoffe zugänglich, deren funktionale Gruppen mit Indikatormolekülen gekoppelt werden können. Dazu gehören die Aminogruppen der Aminosäuren und die Aldo- und Keto-gruppen der Zucker.

Tab. 6, 7 In Tab. 6 und 7 sind die Konzentrationen und Prozentgehalte der Zucker verschiedener Sedimenttypen des Büssumer Watts gegeben. Probe 1 ist vom Eis transportiertes feines Sediment, Proben 2 und 3 repräsentieren einen Schlick und einen Schlicksand von Profil I. Proben 4-7 stellen ein Wattsandprofil dar, und Probe 8 gibt die Analyse von Wurmröhren aus dem Cuxhavener Watt. Zum Vergleich ist ein ozeanisches Planktonmittel und die Analyse eines Süßwasserschlicks aus der Alster gegeben (9 und 10). Die Gesamtkonzentration der Zucker ist niedrig. In den Schlicken wurden 3.6 und 1.2 $\mu\text{mol/g}$ gefunden, der Wurmgang enthält 4.3 $\mu\text{mol/g}$. Das Wattsandprofil besitzt 10-fach niedrigere Konzentrationen zwischen 0.3 und 0.37 $\mu\text{mol/g}$. In ozeanischen Sedimenten wurden dagegen Konzentrationen von 2.1 (Bermuda) bis 250 $\mu\text{mol/g}$ (Schwarzes Meer) gemessen (Mopper und Degens, 1972 a). Auch der Alsterschlick (Tab. 6, Nr. 10) weist mit 17.7 $\mu\text{mol/g}$ sehr viel höhere Zuckergehalte auf.

In Tab. 6, letzte Zeile, ist die Zuckermenge auf Kohlenstoff umgerechnet. Legt man für den Schlick einen Gehalt von 5 % C_{org} zugrunde, so ist der Anteil der Zucker an der organischen Substanz 0.5 % (0.05 g/269 μg). Bei Zugrundelegung von 0.5 % C_{org} für die Wattsande kommt man für diese Proben ebenfalls auf einen Zuckeranteil an der organischen Substanz von 0.5 %.

Kohlenhydrate gehören zu den wichtigsten Bestandteilen der Nahrung. Daß ihr Anteil an der gesamten organischen Substanz so niedrig ist, beweist die äußerste Nutzung der Ressourcen in dem unter Nahrungsdruck stehenden dichtbesiedelten Ökotopt Watt.

Nicht nur die Gesamtmenge der Zucker ist eine wichtige Kenngröße, sondern auch die relative Häufigkeit der einzelnen Zucker (Tab. 7). In terrigenem Pflanzenmaterial ist Glukose mit über 50 % beteiligt, da es die wichtigen Kohlenhydrate Zellulose und Stärke aufbaut. In den besprochenen Proben rangiert es zwar an höchster Stelle der Zucker, variiert aber mit zwischen 8 und 35 % erheblich und erreicht nie Werte nahe 50 %. Dieser Tatbestand zeigt, daß die Zucker nicht primär terrigene Charakteristika besitzen. Aber auch der Vergleich mit der mittleren Zusammensetzung ozeanischen Planktons (Tab. 6, 9) zeigt keine Ähnlichkeit mit den Wattsedimenten, dafür sind die Ribose-Gehalte zu niedrig und die Xylose-Gehalte zu hoch. Diese Vergleiche zeigen, daß das Wattsediment durch eine "residuale" Zuckerzusammensetzung charakterisiert ist. Diese Feststellung wird insbesondere durch die hohen Xylose-Gehalte untermauert. Xylose ist ein Zucker der Zellwände, der wenig am Stoffwechsel teilnimmt und daher mit 13-20 % Gehalten in den Proben eine viel geringere Schwankungsbreite als Glukose aufweist.

Auch Arabinose ist ein solcher "Residual"-Zucker, der z.B. in marinen Organismen nicht vorkommt, dafür aber für Bakterien und Blaugrünalgen charakteristisch ist (Arabino-Galaktone).

Im eistransportierten Sediment erreicht er sogar Konzentrationen höher als Glukose, und im Sedimentprofil nimmt der relative Anteil deutlich mit der Tiefe zu,

Ribose dagegen ist ein Anzeiger von lebenden Zellen, da es als Ribose und Ribosephosphat in Nucleinsäuren eingebaut ist, die nicht sehr stabil sind. In totem Material ist die Ribosekonzentration

tration daher entsprechend niedrig ebenso wie in terrigenem Pflanzenmaterial, wo die Zellulose gegenüber den Nukleinsäuren stark betont ist. Um so interessanter ist die Tatsache, daß im Wattsandprofil (Tab. 6, 5) die Ribose-Konzentration in 3 cm Tiefe an der Grenze zum reduzierenden Milieu besonders hoch ist. Diese Probe ist außerdem durch einen sehr niedrigen Glukose-Gehalt und durch den höchsten Mannose-Gehalt aller Proben gekennzeichnet. Dies läßt sich nur so interpretieren, daß an der Redox-Grenze erhebliche bakterielle Aktivität besteht. Glukose kann in Mannose umgewandelt werden, beide Zucker unterscheiden sich nur durch die epimere Stellung der OH-Gruppe am C-2-Atom. Von Mannose ist bekannt, daß es vom Plankton ausgeschieden werden kann. Welcher Vorgang jedoch eine derart massive Umwandlung verursacht, ist unklar, wie überhaupt die Bedeutung der einzelnen Zucker als "geochemische Faziesindikatoren" nur sehr unvollständig bekannt ist (Ittekkot, 1980).

Von der Fruktose ist bekannt, daß sie leicht und schnell verbraucht wird und ein wertvoller Energieträger ist. Er fehlt im eis transportierten Sediment ganz, während er im Sedimentprofil deutlich nach unten abnimmt, also verbraucht wird. Fruktose ist neben Glukose der frei im Seewasser vorkommende Zucker (Ittekkot, 1980), so daß die im Sediment gemessenen Mengen nicht unbedingt in gebundener Form vorliegen müssen, sondern aus dem Interstitialwasser stammen können. Wie später gezeigt wird, ist im ersten Wasser, das nach der Ebbe das Watt überflutet, der Gehalt an gelöster organischer Substanz besonders hoch.

Es ist aber genau dieses zuerst die Wattsande anströmende Wasser, das in die während der Ebbe teilweise freigefallenen Porenräume eindringt und somit insbesondere Fruktose mit jeder Flut neu in die oberen Zentimeter des Wattsandes einbringt, ein idealer Ausgangsstoff für bakterielle Aktivität im Sediment! Die hier gemessenen hohen Fruktosewerte substantzieren einen solchen Vorgang, dem für den Stoffkreislauf des Watts eine große Bedeutung zukommen könnte. Ein zweiter Vorgang kann diese Fruktoseinfiltration ins Wattsediment noch verstärken: Fruktose ist sehr leicht mit Eisen komplexierbar (Mopper, 1980). Wie bei den EDAX-Analysen gezeigt wurde, ist Eisen aber auch das chemisch wirksamste Element des Wattsediments. Zusätzlich zur infiltrierten Fruktose kann also die Wattoberfläche aus dem Wasser freie Fruktose durch Komplexion binden und es somit für die biochemischen Reaktionen des Ebbezeitraums sammeln.

Im eistransportierten Sediment (Probe 1) wurde ein sehr hoher Rhamnosegehalt festgestellt. Allgemein soll Rhamnose auf bakterielle Tätigkeit zurückgehen; in welchem Zusammenhang dies mit der Probe steht (zum Probedatum herrschten schon mehrere Tage Temperaturen weit unter Null), bleibt unklar.

Beim Wurmgang (Probe 8) fallen die von allen Proben am höchsten relativen Gehalte von Xylose, Galaktose und vor allem Fukose auf. Diese maximalen Gehalte scheinen weniger eine allgemeine Erscheinung der Schlickzusammensetzung des Cuxhavener Watts zu sein, als vielmehr auf spezielle Substanzen in den Wandungen der Wurmbauten zurückzuführen zu sein. Unter dem Elektronen-

Foto 11

mikroskop ist deutlich der Schichtaufbau der Röhre zu erkennen (Foto 11). Die äußere Schicht besteht aus einer "Panzerung" aus Feinsandkörnern, die in das umgebende Sediment verzahnen und so die Röhre verankern. In den Zwickeln sitzt nach innen zunehmend Silt, der die Kornzwickel der Röhreninnenseite völlig füllt und glättet. Die innerste Schicht bildet eine offenbar organische Haut, die beim Trocknen abpellt. Die Haut ist auch bei hoher Vergrößerung nicht in Einzelkörner auflösbar, zeigt aber eine Parallelriefung, die vermutlich von den Borsten des in der Röhre lebenden Anneliden (Pygospio?) herrührt. So brüchig die Röhre im trockenen Zustand ist, so flexibel ist sie offenbar im bewohnten Zustand. Die Anwesenheit von Fukose in hohen Konzentrationen beweist, daß es sich bei der Auskleidung der Röhren um einen echten Körperschleim handelt. Körperschleime bestehen aus Glykoproteinen, den Mucoiden, langen Proteinmolekülen mit mehr oder weniger langen Oligosaccharidseitenketten (Glykoproteine enthalten bis zu 85 % Kohlenhydrate), in denen besonders Fukose auffällt.

Fukose spielt sonst biochemisch fast keine Rolle. Fukose-reich ist speziell die die Blutgruppen determinierende Glykosphingolipide der Erythrozyten-Membranen. In den Mucoiden bauen neben Fukose auch Galaktose, das in unserer Wurmprobe ebenfalls in hoher Konzentration vorkommt, Glukose und Mannose die Seitenketten auf (Karlson, 1974). Fukose kann somit als Anzeiger für die Verkittung des Sediments durch Körperschleime gewertet werden und kann in Zukunft eine wichtige Indikatorrolle bei der Beurteilung von Schlickern spielen.

Am 21.6.1979 fanden sich auf Schnitt I auffällig opalisierende Flecken auf dem deichwärtigen Schlickfeld. Der Verdacht auf Kohlenwasserstoffe lag nahe. Mit einer Spritze wurden 32 ml des oberflächlichen Wasserfilms und etwas Schlick abgesaugt. Diese Probe enthielt nach Ausschütteln mit Benzol 1.1 mg Kohlenwasserstoffe, wovon durch Abtrennung der ungesättigten Sterane mit AgNO_3 auf einer Dünnschichtplatte noch 0.3 mg gesättigte Kohlenwasserstoffe zurückblieben. Auf einen Liter Schlickwasser umgerechnet ergibt sich 9 mg/l, eine ungeheure Konzentration von Fettsäuren und Alkanen. Die gaschromatographische Trennung der gesättigten Kohlenwasserstoffe (Abb. 5) zeigt eine deutliche Dominanz der C14-C20-Ketten und hohe Konzentration bis C30, wobei gerade und ungerade Kettenlängen gleichermaßen repräsentiert sind. Diese Tatbestände zeigen, daß die Alkane nicht aus Erdöl stammen, dann wären Ketten kürzer als C14 dominant, sie stammen auch nicht aus terrigenen Pflanzen, dann müßten die ungeraden Alkane bevorzugt auftreten. Das Spektrum weist vielmehr eindeutig auf marine Algen und Bakterien als Erzeuger hin. Wichtig ist vor allem das Auftreten der Isoprenoide C19-C22, wobei C19 und C20 die Chlorophyllabbauprodukte Pristan und Phytan sind. Das Pristan zu Phytan Verhältnis beträgt 0.7 und ist sehr niedrig. Phytan überwiegt immer dann, wenn der Chlorophyllabbau im Anoxischen geschieht.

Abb. 5

Dies bedeutet, daß im Schlick bakterieller Abbau von Algenzellwänden unter reduzierenden Bedingungen zu enorm hohen Kohlenwasserstoffkonzentrationen führen kann, Konzentrationen, die sogar makroskopisch sichtbar werden! Dieses Ergebnis unterstreicht die Bedeutung biogeochemischer Vorgänge in der Schlickgenese.

2. Geochemie der Tiden

2.1 Einleitung

Das Watt ist durch den periodischen Wechsel von Ebbe und Flut, Trockenfallen und Überflutung gekennzeichnet. Um die Rolle des Überflutungsvorganges für die Sedimentbildung im Watt besser zu verstehen, wurden vier Tiden zu verschiedenen Jahreszeiten geochemisch untersucht. Als Untersuchungsort bot sich das für das Programm auf Schnitt II im Büsumer Watt gebaute Pfahlhaus an (Standort s. Abb. 1), das ca. 6 h pro Tide im Wasser steht. Wegen der Enge (das Haus ist 2x2 m groß, die Plattform 3x3 m) und der Notwendigkeit, einen Generator unter der Plattform hängend zu betreiben, können nicht mehr als drei Leute gleichzeitig arbeiten (bei Windstärken über 4 läßt sich die sich nach W öffnende Tür nicht betätigen, ohne daß im Haus alles ins Flattern kommt. Temperaturen unter 8° C sind wegen des geringen Windschutzes und der geringen Bewegungsfreiheit ebenfalls kritisch, zumal man eben nach Einsetzen der Flut nicht von der Plattform herunterkommt.). Untersuchungen bei höheren Windgeschwindigkeiten und im Winter sind auf der Plattform nicht möglich. Im Winter 1978/79 waren die Deichzufahrtstraßen verschneit und das Watt viel zu vereist, um die Geräte an die Plattform transportieren zu können. Um daher im frühen Frühjahr eine Meßserie zu bekommen, quartierte sich unsere Arbeitsgruppe im Neuen Schleusenhaus an der Dithmarscher Speicherkoogschleuse ein. Das Gebäude ist mit Wasseranschluß, Strom und Arbeitsbänken ideal für Felduntersuchungen, insbesondere die sofortige Analyse der freien Aminosäuren (Lageplan, s. Abb. 6).

Abb. 6

Die Proben wurden an der Molenspitze zwischen Hafenausfahrt und Sielauslaß gezogen. Das direkte Überströmen^{der Wattoberfläche} ließ sich hier nicht verfolgen, da die Fahrwasserrinne auch bei Niedrigwasser Wasser führt; dafür konnte aber 12 h lang gemessen werden. Der Beprobungsabstand betrug für alle Meßserien eine halbe Stunde, kürzere Abstände sind bei solchen Multiparameterstudien logistisch nicht möglich. Die Wetterbedingungen und die Auflaufhöhen sind in Tab. 8 zusammengestellt. Am 10.4.1979 und am 21.6.1979 wurde außerdem eine Kombisonde zur kontinuierlichen Aufzeichnung von pH, Temperatur, Sauerstoff und Salinität eingesetzt.

Tab. 8

2.2 Die gelösten Stoffe

Übersicht

Tab. 9

In Tab. 9 sind die statistischen Größen aller gemessenen Parameter der Probenserien vom 21.9.1978 (Spätsommer), 19.10.1978 (Frühherbst), 10.4.1979 (frühes Frühjahr) und 21.6.1979 (Früh-sommer) gegeben. Die Anzahl der Werte (N), ihr Mittelwert (M), ihre Standardabweichung (s), die Varianz (s^2) und der Variationskoeffizient (v) ($100 \times s/M$) (für Definitionen s. Bahrenberg und Giese, 1975), sind jeweils untereinander aufgelistet. Die Formatierung durch das Computerprogramm läßt alle Werte mit drei Stellen hinter dem Komma erscheinen. Auf eine Abrundung entsprechend der Analysengenauigkeit wurde verzichtet,

Der Vergleich der Mittelwerte und Standardabweichungen der einzelnen Parameter in den vier Serien zeigt, daß alle Größen

signifikante Änderungen zwischen den Meßreihen aufweisen. Hierin zeigen sich saisonale und wetterbedingte Änderungen der Hydrochemie im Büsumer Watt.

Auf der Plattform wurden für die Salinität Werte zwischen 25 und 28,7 ‰ gemessen. Legt man 35 ‰ für Nordseewasser und 1 ‰ für Flußwasser zugrunde, so sind 20-30 % des Büsumer Wassers Frischwasser, aller Wahrscheinlichkeit nach im wesentlichen Elbwasser.

Bedingt durch den Sielauslaß Meldorfener Bucht wurden am 10.4.1979 nur 18 ‰ gemessen, hier beträgt der Süßwasseranteil (im Schnitt) 50 %.

Der pH-Wert ist nicht von der Salinität abhängig, er variiert vielmehr saisonal, hohe Werte zeigen Planktonblüten durch ihre Senkung des CO_2 -Drucks an. Entsprechend ist das Redox-Potential zu interpretieren, das bei hoher biologischer Aktivität im Wasser absinkt. Der Sauerstoffgehalt wiederum dürfte durch Temperatur und biologische Aktivität beeinflusst werden. Die Alkalinität liegt bei den Plattformmessungen unter der des Meerwassers (2.3 mval/l), bei der Schleusenserie aber höher, hier werden die Proben durch Grundwasserzufluß in das Hafengewasser verfälscht. Die aus der Alkalinität berechneten "anorganischen Kohlenstoffgehalte" schließen die Borate mit ein und liegen daher etwas höher als die Bestimmung des anorganischen Kohlenstoffgehaltes mit der ^{Wet-}Combustion-Methode. Der Ca-Gehalt ist gegensinnig zur Alkalinität und liegt in Höhe des Ozeanmittels von 410 mg/l (Sverdrup et al., 1942).

Der Phosphat- und Nitratgehalt ist im Herbst aufgrund überhandnehmender Remineralisationsprozesse am höchsten.

Die Gehalte an organischen Substanzen sind in allen Proben sehr hoch. Wirkliche Vergleiche können nur mit Analysen gleicher Methodik gezogen werden. Hier bieten sich die Daten der SONNE-4 Expedition Bremerhaven-Panama-Hawaii an, die mit den gleichen Geräten gewonnen wurden. Die Daten repräsentieren gleichermaßen Atlantik und Pazifik wie Oberflächen- und Tiefenwässer (unveröffentlicht).

Im Büsser Watt wurden über die Tide gemittelte Konzentrationen des gelösten organischen Kohlenstoffs zwischen 4.2 und 6.5 mg/l gefunden. Charakteristische Oberflächenwerte für Atlantik und Pazifik pendeln dagegen um 1 mg/l. Im ozeanischen Tiefenwasser liegen die Werte sogar häufig tiefer als 0.5 mg/l. In der Nordsee wurden im Fladengrundexperiment 1 mg/l vor der Planktonblüte und 3 mg/l nach der Planktonblüte gemessen (Ittekkot, 1980).

Die Konzentrationen der am 10.4.1979 an der Speicherkoogschleuse gemessenen freien Aminosäuren lagen zwischen 5 mymol/l und 15 mymol/l. Im Atlantik und Pazifik liegen die Gehalte der FAS unter 0.1 mymol/l an der Oberfläche, und im Tiefenwasser sind sie in der Regel noch einmal um den Faktor 5 geringer. Die gemittelte Konzentration der gelösten Kohlenhydrate ist in den beiden analysierten Serien mit 3.6 und 12.3 mymol/l (die Proben wurden übrigens in gemischter Folge bestimmt, der große Unterschied zwischen den Serien ist daher mit Sicherheit real!)

ebenfalls höher als im freien Ozean. Dort wurden an der Oberfläche Werte gefunden, die charakteristisch zwischen 2 und 1 $\mu\text{mol/l}$ liegen.

Die Tiden

Abb. 7-10 In den Abb. 7-10 sind die Parameter der einzelnen Probenserien gegen die Zeit aufgetragen. Die erste Probe erfaßt die ersten schnell über das Watt anströmenden Zentimeter Wasser, die letzte das noch flächenhaft vom Watt ablaufende Restwasser, nachdem der Wasserspiegel schon unter die NN-Höhe des Pfahlfußes gesunken ist (der Wasserspiegel hat in dieser Abflutungsphase quasi einen Knick, da die Wasserlinie nicht exakt definierbar ist wie bei der Überflutung).

Die für die Meßplattform vorgesehenen Strömungsmessungen fanden leider nicht statt. Die Beobachtung zeigt jedoch, daß die Strömung am Anfang unter $40-60^\circ$ schräg vom Priel landwärts zieht, später mehr oder weniger prielparallel wird und auch nach Überschreiten des Hochwassercenterpunktes noch einige Zeit landeinwärts gerichtet ist, bevor die Stromrichtung kentert. Es muß davon ausgegangen werden, daß die Ebbe nicht unbedingt das gleiche Wasser am Haus vorbeiführt, das mit der Flut an diesem Punkt hereinkam. Die ^{maximalen} Stromgeschwindigkeiten liegen bei ca. 1 m/sec. Die Flutphase ist etwas kürzer als die Ebbphase (ca. 15-20 min), was zu höheren Geschwindigkeiten während der Überflutung führt.

Meßreihe 21.9.1978

Die Messungen vom 21.9.1978 (Abb. 7) zeigen deutlich Änderungen in der Hydrochemie des vorbeiströmenden Wassers. Im ersten Wasser ist die Temperatur leicht erhöht, das Wasser strömt über das etwas aufgewärmte Wattsediment, die Salinität ist niedrig; dies könnte ein Hinweis auf bei Ebbe austretendes Grundwasser sein. Auf diese Möglichkeit deuten auch der am Anfang niedrige pH- und Ca-gelöst-Wert hin.

Die höchsten Werte der ganzen Meßserie wurden im ersten Wasser für Sauerstoff, C_{org} (13.1 mg/l ist ein außerordentlich hoher Wert!) und die Kohlenhydrate gemessen. Dies ist eine sehr wichtige Feststellung! Das erste Wasser nimmt beim Anströmen der Wattoberfläche gelöste organische Substanzen auf, die während der Ebbe entweder durch Diatomeen exkretiert oder durch Lysis austrocknender Zellen freigesetzt wurden.

Der hohe Sauerstoffgehalt erklärt sich durch Aufnahme von ganzen Diatomeenfeldern, die während der Ebbe im noch feuchten Oberflächenfilm kräftig photosynthetisieren konnten und ihre Sauerstoffproduktion zu auch makroskopisch sichtbaren Bläschen ansammelten, die sich jetzt in der ersten Wasserschicht lösen und landwärts transportiert werden. Das nachstoßende Flutwasser besitzt eine niedrigere Temperatur, höheren pH, höhere Salinität und abnehmende O_2^- , C_{org}^- und Zuckergehalte.

Beim Abebben sinkt dann Salinität, pH, $Ca_{gelöst}$ und Sauerstoff, während sich der C_{org} -Gehalt zunächst etwas erhöht, um dann abzusinken. Der Gehalt an Kohlenhydraten sinkt dagegen stetig.

Im letzten ablaufenden Wasser steigt die Salinität noch einmal, jetzt werden die landseitig durch Verdunstung während des Tages ausgefallenen Salze, die dort von der Flut aufgenommen wurden, rückgeführt, auch der C_{org} -Gehalt scheint noch einmal anzu- steigen.

Tab. 10 In Tab. 10 sind die Korrelationskoeffizienten der Analysenparameter untereinander gegeben. Die Werte mit einer Signifikanz höher als 90 % sind unterstrichen. So ist z.B. C_{org} signifikant mit Sauerstoff, Zuckern, NO_3 und der Suspension positiv korreliert, mit dem gelösten Ca aber negativ.

Es kann nicht jede der einzelnen Paarungen besprochen werden, hohe positive Korrelationen deuten jedoch darauf hin, daß die Höhe der untersuchten Parameter von gleichen Prozessen abhängt.

Entsprechend den Änderungen der Parameter im Verlaufe der Flut ändert sich auch die Ähnlichkeit der Proben untereinander.

Abb. 11 Dies zeigt deutlich die Abb. 11, in der die Korrelationskoeffizienten der Proben untereinander für bestimmte Proben aufgezzeichnet sind. Die Probe 1 (das erste Wasser) korreliert am besten mit dem letzten Wasser und zunehmend geringer mit den Proben der fortschreitenden Tide. Dies gilt auch, wenn auch nicht in gleichem Maß, für Probe 14 (letzte Probe unterste Zeile, ohne C_{org} - und Zuckerwerte), die am besten mit den ersten Proben zu vergleichen ist.

Die Proben aus den mittleren Phasen der Tide korrelieren am stärksten miteinander und weniger mit der Anfangs- und Endphase der Überflutung.

Meßreihe 19.10.1978

Am 19.10.1978 wurde die erste Probe noch früher als am 21.9. genommen, ca. eine halbe Minute, nachdem die Flutfront den Plattformfuß erreicht hatte. Es zeigt sich, daß der hydrochemische Unterschied zu den anderen Proben noch stärker betont ist (Abb. 8). Im Gegensatz zum 21.9. war das Wetter ruhiger und sonniger, die Flut lief auch weniger hoch auf (vgl. Tab. 8). Dadurch war die Evaporation der Wattoberfläche größer, und das erste Wasser hatte eine wesentlich höhere Salinität als die Hauptmasse des Wassers. Der pH-Wert war (mehrfache Messung) mit fast 8.8 weit höher als der des späteren Flutwassers (um 8.0). Dies beruht auf einer CO_2 -Abreicherung, die sich in einer deutlich geringeren Alkalinität ausdrückt und die auf die Photosynthese während der Trockenphase auf der Wattoberfläche zurückgeht. Dies zeigt auch der hohe Sauerstoffgehalt des ersten Wassers. Ebenso ist das Redox-Potential und der Zuckergehalt im ersten Wasser weitaus höher als in den späteren Proben.

Nach den enormen Änderungen der Hydrochemie in der ersten halben Stunde der Tide ist die Zusammensetzung des Wassers verhältnismäßig konstant. Erst die letzte Probe zeichnet sich durch gestiegene Salinität sowie Sauerstoff-, Kohlenhydrat- und PO_4 -Werte aus. Diese chemische Homogenität des Flutwasserkörpers mag auf die geringe biologische Aktivität wegen fortgeschrittener Jahreszeit zurückgehen. Lediglich die Wattoberfläche ist bei geeigneten Temperaturen und Sonnenständen noch aktiv.

Tab. 11 Die Korrelationsmatrize der Parameter untereinander (Tab. 11). zeigt eine Fülle von negativen und positiven Korrelationen,

die die Signifikanzgrenze von 90 % überschreiten. Dies hängt hauptsächlich mit dem sich stark ändernden Chemismus der ersten Probe zusammen und den sich im übrigen kaum ändernden Verhältnissen.

Meßreihe 10.4.1979

Abb. 9 Um die Kurven der Meßserien vom 10.4.1979 an der Dithmarscher Speicherkoogschleuse (Abb. 9) zu verstehen, muß die spezielle Lage der Beprobungsstelle beachtet werden (Abb. 6). Die Salinitätskurve erklärt dies am besten: Morgens hatten bei Niedrigwasser die Sieltore angesprochen und Süßwasser über das Meerwasser geschichtet. Die Flut mischte Meerwasser ein, und bereits um 9.00 Uhr waren stabile Werte um 20 ‰ erreicht. Mit Einsetzen der Ebbe zog offenbar zunächst das leichtere Oberflächenwasser ab, die Salinität erhöhte sich auf 20.9 ‰. Kurz vor dem Erreichen des Niedrigwassers wurde die Hafenschleuse dann geöffnet und das Hafenwasser schichtete sich über das Meerwasser, die Salinität sank bis auf 10 ‰ ab. Das Siel öffnete sich dagegen nicht. Nach Kentern der Ebbe und Schließen der Hafentore stieg die Salinität schnell wieder an.

Entsprechend diesen Wasserbewegungen sind auch die Kurven der anderen hydrochemischen Parameter weniger auf Ebbe-Flut-Phänomene zurückzuführen, sondern eher auf die unterschiedliche Qualität der drei verschiedenen Wassermassen, (i) Sielauslauf Meldorfer Speicherkoog, (ii) hereindrückendes Flutwasser und (iii) Wasser des Hafenbeckens sowie deren Mischungen. Das Sielwasser (Beginn der Kurven) zeichnet sich durch einen niedrigen pH-Wert und

hohe Alkalinität (und daher anorganische Kohlenstoffgehalte) aus, entspricht also der Zusammensetzung von Flußwasser. Auch der Sauerstoffgehalt und der Gehalt an freien Aminosäuren ist höher als im Seewasser. Sehr viel höher dagegen sind die Werte für das PO_4 und C_{org} .

Mit Steigen der Salinität sinken alle diese Werte, um gegen 17.00 Uhr vor Öffnung der Hafenschleuse ihre niedrigsten Werte zu erreichen. Eine massive Planktonblüte ist trotz Mittagszeit und Sonnenschein nicht in Gang gekommen; dies zeigen insbesondere die unverändert abnehmenden Gehalte an freien Aminosäuren.

Ganz anders dagegen lagen die Verhältnisse im abgeschlossenen Hafenbecken. Hier hatte es eine heftige Planktonblüte gegeben! Die Probe um 17.00 Uhr hatte maximalen Sauerstoffgehalt und die höchsten gemessenen pH- und Eh-Werte. Die Planktonblüte war so heftig, daß sogar die im Hafenwasser sonst hohe Alkalinität deutlich gedrückt wurde (Minimum der Kurven um 17.30 Uhr) und daß kein PO_4 im Wasser nachweisbar war. Die 17.30 Probe repräsentiert offenbar die oberste Wasserschicht des Hafens, die bei Öffnen der Schleuse über das Meerwasser geglitten war, das tiefere Hafenwasser kam erst später, nachdem es von Salzwasser unterschichtet war. Es enthält von der Planktonblüte weniger beeinflusstes Wasser mit hohen Phosphatgehalten und hoher Alkalinität, der Sauerstoffgehalt sinkt merklich. Der Gehalt an C_{org} erreicht aber erst in dieser zweiten Hafenwasserprobe sein Maximum, das durch beginnende Lysis der plötzlich ins Meerwasser

hineingemischten Phytoplankterzellen erzeugt sein kann. Auch der Gehalt an freien Aminosäuren steigt noch einmal. Am Ende der Kurven läßt mit der neuen Flut hereindrückendes Meerwasser alle Werte wieder absinken. Trotz gleicher Wetterbedingungen hatte die geringere Wasserbewegung im Hafen die Bildung einer ersten Thermokline erlaubt. Sonneneinstrahlung und hohe Nährstoffgehalte hatten eine lehrbuchartige Planktonexplosion zur Folge. Die Stabilität der Wassersäule scheint der Hauptfaktor für die Auslösung gewesen zu sein.

Die hohe Alkalinität und die hohen Phosphatgehalte zeigen, daß das Hafenwasser Zufluß von Frischwasser durch den umgebenden Sandkörper bekommt, obwohl zur Zeit der Messung kein oberflächlicher Zugang zwischen dem Sielzulauf und dem Becken bestand.

Aus der Abhängigkeit der Parameter von den verschiedenen Wassermassen ist klar, daß die Korrelationen der Werte untereinander in den meisten Fällen sehr hoch signifikant sind. Es erübrigt sich daher, die Matrize hier zu besprechen.

Meßreihe 21.6.1979

Vor Beginn der Meßreihe wurde auch das Büsumer Hafenbecken beprobt, die Ergebnisse sind in Abb. 10 gestrichelt an die Werte der Meßplattform angebunden. Bis auf die etwas niedrigere Salinität zeigt sich, daß alle Werte über den meisten des Plattformprofils liegen. Das Wasser im Büsumer Hafen ist also biologisch aktiver als das Wasser der freien Meldorfer Bucht.

Abb. 10

Die Tide erreichte den Fuß der Plattform schon um kurz nach 7.00. Da der Sonnenaufgang aber bereits um 4.00 erfolgte, war Zeit gegeben, um durch Photosynthese an der Wattoberfläche den pH-Wert, den Sauerstoffgehalt und den Gehalt des C_{org} erheblich zu erhöhen. Die Kraft der Sonne hatte aber nur für eine kleine Temperaturerhöhung sorgen können, so daß das erste Wasser zwar viele organische Substanzen aufnehmen konnte, die Temperatur und Salinität aber nur wenig höher als im nachfolgenden Wasser waren.

Die in dieser Meßserie sehr hohen allgemeinen pH-Werte und die niedrige Alkalinität entsprechen der Jahreszeit mit vorherrschend starker Photosynthese in allen Gewässern. Die Elbe bei Hamburg zeigt im 23-jährigen Mittel Alkalinitätsschwankungen von 2.0 im April und 2.4 mval/l im November, im Juni sind es im Mittel 2.1 mval/l (Kempe, 1979).

Im Laufe des Tages erhöhte sich die Wassertemperatur erheblich und stieg mit abnehmender Wassertiefe exponential bis fast 20° C an. Das letzte abfließende Wasser zeichnete sich wieder durch erhöhte Sauerstoff- und C_{org} -Gehalte aus.

Während dieser Meßreihe wurden auch mit der Kombisonde am Fuß des Pfahls pH, Temperatur, Sauerstoff und Salinität kontinuierlich aufgezeichnet. Die anhand der Einzelbestimmungen geeichten Kurven sind in Abb. 12 geplottet. Besonders interessant ist die Sauerstoffkurve, die zeigt, daß der O_2 -Gehalt gleich bei sehr hohen Werten beginnt, dann innerhalb weniger Minuten noch weiter ansteigt, und dann um volle 2 mg/l abzusinken. Nach

Abb. 12

10 Minuten sinkt der Sauerstoffgehalt langsamer und ist nach etwas mehr als einer halben Stunde auf die Werte des heranttransportierten offenen Wassers abgefallen. Die herbeiströmende Flut schiebt also einen bis 10 cm tiefen und 10m breiten Wasserkörper vor sich her, der von den vom Watt aufgenommenen Stoffen durchgehend verändert wurde. Bei ca. 50 cm Wassertiefe und nach einer halben Stunde Überströmungszeit ist die Beeinflussung abgeklungen. Interessant ist außerdem die Unruhe der O_2 -Kurve, die nicht gerätebedingt ist. Möglicherweise ist sie Abbild der Turbulenz des Wasserkörpers. Für diese Probenserie vom 21.6. ist wieder die Korrelationsmatrize der Parameter untereinander gegeben (Tab. 12). Es sei besonders auf die hohen (negativen und positiven) Koeffizienten zwischen C_{org} einerseits und der Tidenhöhe, dem pH-Wert, dem Sauerstoff- und dem Suspensionsgehalt hingewiesen.

Die Zusammensetzung der gelösten Zucker

An sechs Proben wurde auch die Zusammensetzung der im Wasser gelösten Zucker bestimmt. Die Ergebnisse sind in Absolutgehalten (nmol/l) und Prozentzusammensetzung in den Tab. 13 und 14 dargestellt.

Für zwei der Proben vom 21.9.1978 liegen auch die mit der L-Tryptophan-Schwefelsäure-Methode gemessenen Gesamt-Kohlenhydrate vor (letzte Zeile Tab. 13). Sie liegen deutlich höher als die Summe der mit dem Säulenchromatographen gemessenen Zucker. Dies liegt vermutlich weniger an fehlerhaften Analysen; denn

einerseits werden bei der L-Tryptophan-Methode einfache Aldehyde und Ketone miterfaßt, und andererseits spielt der Grad der Kondensierung der organischen Substanz eine Rolle. Bei der Tryptophan-Methode wird mit Schwefelsäure bei 100° C hydrolysiert, bei der Säulenchromatographie wird mit Salzsäure hydrolysiert. Es ist daher möglich, daß die Kohlenhydrate, die am Beginn der Flut von der angetrockneten Wattoberfläche aufgenommen werden, so stark kondensiert sind, daß nur die Schwefelsäure sie völlig hydrolysiert. Dies Problem ist allen Zuckeranalysen immanent, da man eben keine Standards hat, die bei bekannter Zusammensetzung die Kondensation natürlicher organischer Substanz modellieren.

Die Gesamtmenge der im Wasser gemessenen Zucker liegt um etwa das Doppelte über dem, was im FLEX-Programm in der Nordsee gemessen wurde, wobei dort während der Planktonblüte um ein Viertel höhere Konzentrationen herrschten als vor der Planktonblüte. Auch der in der Alster gemessene Wert liegt niedriger als die der Wattwässer, während der durch Zelluloseabwässer stark belastete Baikalsee höhere Konzentrationen erbrachte. Von besonderem Interesse ist wieder das Verhältnis von Zucker-Kohlenstoff zu gesamtgelöstem Kohlenstoff, das für die Wattwasserproben zwischen 2 % und 5 % beträgt (vorletzte Zeile). Dies Verhältnis ist viel höher als das der organischen Substanz der Wattsedimente (s. Abschnitt 1.3 und Tab. 6). Im Wasser stehen also prozentual zum Gesamtgehalt an organischer Substanz ca. zehnmal mehr Kohlenhydrate als Nahrungsbasis zur Verfügung als im Sediment.

In der Nordsee sind Glukose und Fruktose die hauptsächlich in Lösung befindlichen freien Zucker (Ittekkot, 1980).

Auch in der Probenserie vom 21.9. ist Glukose mit über 50-70 % beteiligt. Zweitwichtigster Zucker ist die Galaktose, die aus dem Plankton stammen dürfte (vgl. die mittlere Zusammensetzung des ozeanischen Planktons in Tab. 7). Die erste Probe ist die von 13.00, also die zweite der Serie und nicht die des "ersten Wassers". Dennoch fallen an dieser Probe zwei Dinge auf, (i) enthält sie als einzige Fukose, offenbar aufgenommen aus den Glykoproteinen, die die Wattwürmer während der Trockenperiode mit den Kotpillen an die Oberfläche gebracht hatten und (ii) enthält sie kaum Fruktose, das vermutlich beim Überstreichen des Wassers über die Wattoberfläche an das Eisen komplexiert wurde. Bei der 16.30 Probe vom Höhepunkt der Flut fällt der hohe Ribosegehalt ins Auge, offenbar Produkt frischer Planktonexkretionen und/oder geplatzter Planktonzellen auf dem Filter. In allen drei Proben ist der Gehalt an Xylose und Arabinose, den typischen im Sediment angereicherten "Residual"-Zuckern, gering.

Aus der Probenserie vom 10.4.1979 wurden ebenfalls drei Proben analysiert. Auch in dieser Serie ist Glukose der am häufigsten vorkommende Zucker. Die Gesamtmenge der Zucker und die Gesamtmenge der Glukose ist in der letzten Probe am größten, die das Wasser der Hafen-Planktonblüte repräsentiert. Bedingt durch die Zunahme des Planktons zur Mittagszeit und im Hafenwasser steigt auch der Galaktosegehalt absolut und prozentual ganz erheblich.

~~Die Fruktose erreicht in der mittleren Probe ihre höchste Konzentration. Dies kann durch die zunehmende Zell-Lysis des am Morgen aus dem Sielablauf ins Meerwasser geratenen Planktons~~

zurückgehen. Die Planktonblüte im Hafen hat offenbar nicht direkt fruktosehaltige Kohlenhydrate freigesetzt. Interessant ist ferner der morgens und abends hohe Mannose-Wert. Mannose kommt ebenfalls im Plankton vor (s. planktonisches Mittel in Tab. 7) und scheint hier aus dem Plankton des Sielwassers und des Hafens in das Wasser gelangt zu sein.

Diese Beispiele zeigen, daß Zuckeranalysen wichtige Hinweise auf die im Wasser ablaufenden biochemischen Prozesse zu geben vermögen.

2.3 Die Suspension

Suspensionskonzentration

Die Mittelwerte der Suspensionskonzentrationen der untersuchten vier Tiden in Tab. 9 zeigen große Differenzen zwischen den einzelnen Probenreihen. Dies hängt mit den Windverhältnissen zusammen. Am 21.9.1978 wurden im Mittel 109 mg/l Suspension gemessen; wie Tab. 8 zeigt, herrschte an diesem Tag Windstärke 4. Alle anderen Serien wurden bei geringeren Windgeschwindigkeiten gewonnen.

Die Variationskoeffizienten der Suspensionsgehalte der Plattformmessungen sind sehr hoch (Tab. 9). Der Suspensionsgehalt ändert sich in charakteristischer Weise mit der Tide. Die Gangkurven sind in den Abb. 7, 8 und 10 dargestellt. Am 21.6.1979 (Abb. 10) sank der Suspensionsgehalt von 80 mg/l im "ersten Wasser" auf unter 30 mg/l zur Zeit der Flut. Im letzten Wasser erhöht sich die Konzentration noch einmal auf 37 mg/l. Diese

gesetzmäßige starke Asymmetrie der Suspensionskurve zeigt, daß der Suspensionsgehalt nicht allein eine Funktion der Überströmungsgeschwindigkeit ist. Zwar ist auch die Tidenkurve am ~~Mess~~punkt merklich asymmetrisch und entsprechend dürfte auch das auflaufende Wasser eine etwas höhere Geschwindigkeit haben als das ablaufende Wasser. Die von der Suspensionskurve gezeigte Asymmetrie ist jedoch weit stärker als die der Tidenganglinie. Die sehr hohen Suspensionsgehalte zu Beginn der Überflutung sind vielmehr im Zusammenhang mit den hydrochemischen Daten erklärbar: Die während der Ebbe von Diatomeen und anderen Algen auf der Wattoberfläche erzeugten Sauerstoffbläschen sind durch freigesetzte organische Substanzen an die Schlickpartikel festgeklebt (die schleimbildenden Glykoproteine spielen hier möglicherweise eine bedeutende Rolle, wie die Zuckeruntersuchungen ergaben) und heben die Diatomeenfelder mitsamt anhaftenden Partikeln von der Wattoberfläche, sobald das erste Wasser sie erreicht und ihnen Auftrieb verleiht ("Bläschen-Lifting"). Dieser Zusammenhang erklärt die Tatsache, daß die Suspensionskonzentration z.B. mit dem Sauerstoffgehalt eine höhere Korrelation aufweist als mit der Tide.

Die Suspensionskurve vom 10.4.1979 ist dagegen ausgeglichener, da an der Schleuse ja nicht der Überströmungsvorgang des Watts verfolgt werden konnte (Abb. 9). Hier verursacht lediglich das aus dem Hafenbecken strömende Wasser eine Erhöhung der Suspensionskonzentration um 10 mg/l aufgrund der dort abgelaufenen Planktonblüte (Probe um 17.30).

Suspensionszusammensetzung

Tab. 15

Die Zusammensetzung der Suspension wurde einerseits mit dem EDAX-System untersucht (Mittelwerte der Serie in Tab. 15), andererseits wurden Ca- und Mg-Bestimmungen mit der Atomabsorption durchgeführt (Tab. 9). Insgesamt schwankt die Zusammensetzung der Suspension innerhalb der Meßreihen und zwischen den Meßreihen erstaunlich wenig. Dies zeigt der Vergleich der Mittelwerte der einzelnen Elemente untereinander und die Betrachtung ihrer Standardabweichungen in Tab. 15. Das Mg scheint im wesentlichen aus Meersalzen zu stammen, es ist in der Serie vom 21.6.1979 besonders stark vertreten, weil die Suspensionskonzentration auf dem Filter nur gering war. Unter diesen Umständen wird das zuletzt ausfallende Meersalz die anderen Partikel überkrusten und so das Gesamtergebnis zu seinen Gunsten beeinflussen. Die EDAX-Messung erfaßt die Zusammensetzung der vom Elektronenstrahl getroffenen Oberflächen, nicht aber das Innere der Körner!

Auch das Al zeigt am 21.6.1979 ein Maximum, bei ruhigem Wasser ist offenbar der Gehalt an Tonmineralen in der Suspension besonders hoch. Die Elemente Si, Fe und Ca sind dagegen niedriger als in den anderen Serien. Dies ist zum Teil auf die Maskierung durch den höheren Mg-Gehalt zu erklären, so daß der prinzipielle Unterschied einzig in der höheren Al-Konzentration zu bestehen scheint. Eisen ist insgesamt das Element mit der höchsten Standardabweichung in Relation zum Mittelwert. Dies unterstreicht seine geochemische Bedeutung als mobiles Element des Watts.

Bei der Beurteilung der im Vergleich zu den anderen drei Serien hohen Standardabweichungen aller Elemente in der Serie vom 21.6.1979

ist zu beachten, daß gegen Ende der Probenserie die Zahl der Zellen des Flagellaten Noctiluca immer stärker zunahm. Seine Zellen hinterlassen beim Trocknen auf dem Filter kreisrunde Abdrücke, hier liegt die dünne Zellmembran auf dem anorganischen Hintergrund. Die in der Zelle enthaltenen Magnesiumsalze maskieren dann die anderen Elemente, so daß je nach Anzahl der im Untersuchungsfeld getrockneten Zellen das Mg (und natürlich auch Na, Cl und S) zunimmt und damit die anderen Elemente stark variieren.

Abb. 13 Als Beispiel für die geringe Änderung der (anorganischen) Suspensionszusammensetzung während einer Überflutung ist die Serie vom 19.10.1978 (Meßplattform) in Abb. 13 und die Serie vom 10.4.1979 (Schleuse) in Abb. 14 dargestellt. Die einzigen Schwankungen, die in beiden Diagrammen interpretierbar erscheinen, sind die Si-Zunahme und die Al-Abnahme gegen Abend des 10.4. Hier macht sich die massive Stephanodiscus-Blüte auf den Filtern im Si-Gehalt direkt bemerkbar.

Tab. 16 Geochemische Aussagen lassen sich auch aus den Element-Korrelations-Matrizen ziehen, die in Tab. 16 zusammengestellt sind. Na und Mg sind immer signifikant (gemeint ist immer eine Signifikanz von über 90 %) korreliert, da beide das Meerwassersalz repräsentieren. Si korreliert als Hauptelement mit allen anderen fast immer negativ, sehr häufig auch signifikant negativ, da bei seiner Zunahme alle anderen Elemente abnehmen. Wichtig ist die Korrelation zwischen Al und K, die, anders als in den Sedimenten, in der Suspension negativ, meist sogar signifikant negativ, korreliert. Dies bedeutet, daß Illit in der Suspension

nicht die Rolle als Tonmineral spielt wie im Wattsediment. Da K aber mit Na nicht korreliert, kann es auch nicht aus dem Meerwasser auskristallisiert sein. Auf der anderen Seite ist K aber positiv, zum Teil signifikant, mit Ca und Fe korreliert, während Al mit diesen Elementen negative Koeffizienten zeigt. Hier dürften sich interessante mineralogische Prozesse verbergen, die mit der Bildung von Tonmineralen im Seewasser einerseits und mit der Eigenschaft der EDAX-Analyse, die Oberflächen zu repräsentieren, andererseits zusammenhängen dürften.

Die mit der Atomabsorptionsmethode durchgeführten Bestimmungen des Ca und Mg an der Suspension geben uns im Sinn die gleichen Ergebnisse wie die EDAX-Werte: Der Mg-Gehalt ändert sich mit dem der Suspension wenig, es handelt sich um den beim Trocknen hängengebliebenen Meersalz-Hintergrund. Das Ca folgt in seiner absoluten Menge pro Liter (s. Abb. 7 und 8 und Tab. 9) dem Gang der Suspension, d.h. der prozentuale Gehalt an Ca ändert sich während der Tide in der Suspension wenig.

Die Mineralzusammensetzung der Suspension wurde mit dem Röntgenbeugung-Pulververfahren untersucht. Die Filter wurden dafür direkt in die Zählkammer eingespannt. Repräsentative Spektren sind in Abb. 15 zusammengestellt. Deutliche Peaks hinterlassen Quarz, Calcit und Feldspäte, Steinsalz, Gips und die Tonminerale der Kaolinit-, Illit- und Chlorit- und/oder Montmorillonitgruppe. Der stark erhöhte Untergrund in der vorderen Hälfte der Spektren geht auf (i) amorphe Kieselsäure (dem Opal der Diatomeenmatrizen), (ii) amorphe Eisenverbindungen und (iii) schlecht kristallisierte Tonminerale zurück.

Abb. 15

Betrachtet man die Spektren der vier Suspensionen vom 21.6.1979, so fällt die Variabilität des Quarzpeaks auf. Am höchsten ist er im "ersten Wasser", was auf mitgeführte Sandkörner hinweist. Die Suspension des Stromkentrums zeigt keinen Quarz mehr, und auch das rückflutende Wasser enthält nur wenig Sand, ebenso wie das Hafenwasser. Auch der Calcitpeak ist nur im "ersten Wasser" wirklich deutlich.

Ein weiteres Merkmal der Unterscheidung ist die Höhe des Untergrundes: Sie ist im "ersten Wasser" deutlich geringer als in den anderen Proben, einschließlich des Hafenwassers. Dies bedeutet, daß die Suspensionspartikel des "ersten Wassers" weniger stark mit Eisenverbindungen und sehr kleinen ungeordneten Tonmineralen maskiert sind; alle Partikel sind "sauberer". Offenbar ist die von der Wattoberfläche aufgenommene Suspension während der Ebbe verändert worden. Ob dies rein chemische oder biologische Prozesse (z.B. mikrobielles grazing auf Tonmineraloberflächen) bewirken, ist eine interessante Frage. Bemerkenswert ist noch, daß in der "ersten Wasser"-Probe ein 14 Å Mineral (Chlorit- oder Montmorillonitgruppe) erkennbar ist, das später fehlt.

Auch die Suspensionen vom 10.4.1979 wurden röntgenographisch untersucht. In diesen Proben sind die Reflexe von Quarz, Calcit und Feldspat deutlicher als in den Proben vom 21.6. Dies dürfte jedoch nicht auf höhere Sandanteile in der Suspension zurückgehen, sondern auf vom noch unbegrünten Deichbauwerk ständig mit dem Wind herantransportiertes feines Material.

Nur ein Teil der Proben zeigte einen Peak des 14 \AA Minerals, dagegen waren die Tonminerale Kaolinit und Illit in allen Proben deutlich nachweisbar. Opal und andere amorphe Minerale erhöhen die Basis stark. Tidenabhängige Unterschiede der Basiserhöhung durch amorphe Minerale sind in den Diagrammen aber nicht zu erkennen. Dieser Befund deckt sich mit der schon besprochenen sehr konstanten EDAX-Zusammensetzung der Suspension.

Vergleicht man die allgemeine Zusammensetzung der Suspension mit der der Wattsedimente (Tab. 15 und 4), so ist die Suspension sehr deutlich Al-reicher und Si-ärmer als das Sediment. Mg, K, Ca und Fe erreichen in der Suspension ebenfalls höhere Durchschnittswerte als im Sediment. Als Suspension werden also selektiv bestimmte Teile des Wattsediments mobilisiert, die zu einer geochemischen Differenzierung zwischen Suspension und unterliegendem Sediment führen.

Ein Grund für den niedrigen Si-Gehalt ist das weitgehende Fehlen von Quarz-Sandkörnern in den Suspensionsproben. Nur in den Serien vom 21.9. und 19.10.1979 waren Sandkörner vorhanden, vor allem zu Beginn und am Ende der Tide. Abb. 16 zeigt die Zählung der Feinsandkörner auf einer Filteroberfläche von ungefähr 1 mm^2 .

Abb. 16

Der Anteil des Sandes in Suspensionen ist nicht nur eine Funktion der Strömungsgeschwindigkeit und der Wellenenergie, sondern auch der Wasserhöhe (Führböter, 1979). Korngrößen vom Feinsand aufwärts sind im fließenden Medium inhomogen verteilt und nehmen zum Boden hin zu (Graf, 1971). Da die Meßplattform-Proben jeweils

von der Wasseroberfläche gezogen wurden, ist es nicht verwunderlich, daß der Anteil an Sand mit zunehmender Flut schnell abnimmt. Der Sohltransport wird demnach von den vorgelegten Messungen nicht erfaßt.

Die wenigen auf den Filtern vorhandenen Sandkörner reichen auch in den frühen Flutstadien nicht aus, um die Si-Konzentration auf den Filtern merklich zu beeinflussen.

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen

Außer den spärlichen Sandkörnern sind in der Suspension unter dem Rasterelektronenmikroskop bei kleiner Vergrößerung die aufgewirbelten, benthischen und die herangeführten planktonischen Organismen zu sehen, vor allem Diatomeen und vereinzelte größere Grünalgenzellen und Copepoden. In den Fotos 12, 13 und 14 sind (bei gleicher Vergrößerung, ca. 1100-fach) die Filteroberflächen der Proben der Serie vom 10.4.1979 abgebildet. Die artenreiche aber individuenarme Flora des freien Wassers vor der Schleuse steht im auffälligen Gegensatz zu dem Massenvorkommen der Diatomee *Stephanodiscus*, die eine massive Planktonblüte im Hafengewasser erlebte (Probe 17.30, Foto 14).

Die Hauptmasse der Suspension wird aber durch kaum noch identifizierbare Bruchstücke von Diatomeen, Coccolithen und vor allem Tonmineralen gebildet (Foto 15). Der Grad der Verklebung der Partikel ist in den verschiedenen Serien unterschiedlich. (Foto 16)

Bei der elektronenmikroskopischen Beurteilung der Filterrückstände ist zu berücksichtigen, daß mit Ausnahme

der planktonischen Zellen die besonders feinen Partikel als letzte Schicht auf das Filter sedimentieren. Es ist daher verständlich, daß z.B. auf den Filtern des "ersten Wassers" keine Kotpillen zu sehen sind, alle größeren Strukturen wurden zuerst sedimentiert und später durch die feinen Partikel überdeckt.

D. Diskussion verschiedener Aspekte der Schlickbildung im Buisumer Watt

Akkumulation kann nur dort stattfinden, wohin zunächst transportiert wurde. Akkumulation und Transport sind gegensätzliche Prozesse. Transport setzt ein bewegtes Medium voraus, Akkumulation und Sedimentation aus diesem Medium kann chemische, physikalische und biologische Gründe haben.

Das Zusammenspiel zwischen den hydrographischen Charakteristika der Tide und den hydrodynamischen Eigenschaften von Partikeln ergibt eine der Hauptursachen des landwärtigen Netto-Transports in Wattgebieten.

Im Hjulström-Diagramm (Hjulström, 1935) ist die Abhängigkeit zwischen Fließgeschwindigkeit und Partikelgröße in Bezug auf Erosion, Transport und Deposition dargestellt. Für Mittelsande (300-600 μ) genügen zur Erosion schon Geschwindigkeiten von ca. 20 cm/sec, während kleinere und größere Partikel aufgrund ihrer Lagerung bzw. Schwere höhere Geschwindigkeiten benötigen. Um Ton zu mobilisieren, werden Geschwindigkeiten über 200 cm/sec benötigt. Um einmal suspendierte Partikel zu transportieren, reichen dagegen weit niedrigere Geschwindigkeiten aus;

denn Transport erfolgt immer dann, wenn die advektive Turbulenz des Wassers die Sinkgeschwindigkeit des Partikels kompensiert (Biggs, 1973). Postma (1967) hat gezeigt, daß für Silt und Ton allerdings zusätzlich der Wassergehalt für die Höhe der kritischen Erosionsgeschwindigkeit von großer Bedeutung ist. Feine Sedimente mit über 80 % Wassergehalt lassen sich bei 20 cm/sec erodieren, solche mit nur 50 % aber erst bei den erwähnten hohen Geschwindigkeiten.

Ein von der auflaufenden Flut erodiertes Partikel wird solange landwärts befördert, bis die Geschwindigkeit unter die für dieses Partikel kritische Transportgrenze fällt. Jetzt beginnt es in der Wassersäule abzusinken und wird, bis es den Boden erreicht, mit der erlahmenden Flut noch ein Stück landwärts befördert. Postma (1967, 1976), der diesen Vorgang ausführlich beschreibt, nennt das den "settling lag". Da das sedimentierte Partikel eine viel höhere Geschwindigkeit zur Erosion benötigt als zum Transport (der "scour lag" nach Postma), kann es erst bei fortgeschrittener Ebbe wieder erodiert werden und wird dann um ein gutes Stück weniger seewärts transportiert, als es ursprünglich landwärts verfrachtet wurde. Bei Niedrigwasserkehrerung tritt noch einmal der "settling lag" ein, diesmal aber in seewärtiger Richtung. Im Verlauf von mehreren Fluten gerät so das Teilchen in immer landwärtigere Positionen, bis es vom Flutstrom auch bei Hochwasser nicht mehr bewegt werden kann. Je höher es auf dem Watt liegt, um so länger kann es zudem austrocknen und um so höher ist seine Resistenz gegen Erosion mit der nächsten Flut.

Van Straaten und Kuenen (1976) fanden bei dem Versuch, den settling und den scour lag Effekt quantitativ abzuschätzen, daß der scour lag der effektivere bei der Akkumulation des Schlicks sei.

Verstärkt wird dieser landwärtige Netto-Transport durch die Tatsache, daß die Flutwelle auf Wattgebieten immer asymmetrisch ist, der Flutstrom also schneller als der Ebbstrom ist, wie dies auch an Tidenkurven an der Meßplattform zum Ausdruck kommt. Allein aus der Tatsache, daß der Zeitabstand zwischen den Strömungsmaxima des Ebb- und Flutstroms kürzer als umgekehrt zwischen Flut- und Ebbstrom ist, errechnet Groen (1976) in einem Suspensionsmodell eine Netto-Landtransportkapazität von 38 % des Flut-suspensionsgehaltes.

Curray (1969) und Van Straaten und Kuenen (1976) weisen auf einen dritten Effekt hin, der die landwärtige Akkumulation beschleunigt: Während der Flut ist die mittlere Wassertiefe sehr viel geringer als während des Niedrigwassers, da sich dann das Wasser in den tiefen Prielen gesammelt hat. Der Sedimentationsweg ist daher für jedes Partikel zur Zeit des Hochwasserkernterns sehr viel geringer, und mehr Partikel können sich absetzen, die dann die Wattgebiete relativ schneller aufhöhen gegenüber der Sedimentation in den Prielen. Diese hydromechanischen Transportprozesse wirken mit Sicherheit auch im Büsumer Watt und erklären einen Teil der Asymmetrie der an der Meßplattform aufgezeichneten Suspensionskurven (vgl. Abb. 8-11). Daß aber gerade das "erste Wasser" die höchsten Konzentrationen enthalten soll, ist schwer erklärbar, da wegen der hohen Bodenreibung dieses Wasser für eine derartige Erosion nicht die genügende Geschwindigkeit haben sollte. Natürlich könnte man annehmen, daß im ersten Wasser die besonders wasserreichen Sedimentteile mitgerissen werden (Erniedrigung der Erosionsgrenze mit zunehmendem Wassergehalt im

Sinne Postmas, s.o.) und Van Straaten und Kuenen (1976) argumentieren auch so, doch widerspricht dies der während der Ebbe erfolgenden Austrocknung gerade der obersten Sedimentlagen auf den trockengefallenen Wattflächen. Es ist sicher viel unproblematischer, die hohe Suspension im ersten Wasser durch den Auftrieb der Partikel durch anhaftende, während der Ebbe von Diatomeen und Algen erzeugte Sauerstoffbläschen zu erklären. Dieser Vorgang ist völlig unabhängig von der Morphologie des Watts, und er ist um so wirksamer, je ruhiger das Wetter ist.

Van Straaten und Kuenen (1976) vermuten, daß der Schaum an der Flutkante von der aus dem trockengefallenen Sediment durch das Wasser herausgedrückten Luft stammt. Dieser Vorgang scheint mir jedoch quantitativ nicht bedeutsam zu sein. Die Bodenluft mag zwar nicht ganz O_2 -abgereichert sein, könnte also eine gewisse Erhöhung des O_2 -Gehaltes im "ersten Wasser" verursachen, sie könnte jedoch nicht den pH-Wert zu basischen Werten verschieben, denn die Bodenluft sollte aufgrund der mikrobiellen Zersetzungs Vorgänge erheblich an CO_2 angereichert sein, könnte also das Wasser höchstens "ansäuern".

Der sehr hohe Sauerstoffgehalt des "ersten Wassers" und der Augenschein sprechen für die Wirksamkeit dieses "Blasen-Liftings". Jeder, der im Watt die über die Oberfläche heranstreichende Flut beobachtet hat, kennt die Schlieren von auf der Oberfläche mitgeführter Suspension. Bei bewegter Wasseroberfläche werden diese Felder sehr schnell zerschlagen und als echte Suspension ins Wasser überführt. Wichtig bei der Diskussion dieses Prozesses

ist die Tatsache, daß sich die Zusammensetzung der Suspension einer Flutphase nicht ändert, die Suspension des "ersten Wassers" also dem Mittel der Zusammensetzung der späteren Suspensionen entspricht. Das "Blasen-Lifting" hebt also vor allem die Sedimentpartikel ab, die bei der vorigen Flut schon aus der angelieferten Suspension abgesetzt worden waren. Es wird also nicht etwa fraktioniert und im ersten Wasser spezielle, z.B. die kleinsten Partikel, zuerst mobilisiert. Dies würde sich nämlich durch besonders hohe Al- und Fe-Gehalte bemerkbar machen.

Neben den rein physikalischen Absetzvorgängen bei nachlassender Strömungsgeschwindigkeit führt auch die chemisch bedingte Flockung der Suspension zu einer Beschleunigung der Sedimentation. Van Straaten und Kuenen beobachteten, daß die Korngrößen des Schlicks in der Regel kleiner 40 μ betragen, die für ein Absetzen so kleiner Körner jedoch erforderlichen geringen Stromgeschwindigkeiten im Watt fast nie erreicht werden, die Schlickpartikel daher aller Wahrscheinlichkeit nach in koagulierter Form in größeren Komplexen sedimentieren. In der nördlichen Meldorfer Bucht herrschen nach den Salinitätsmessungen marin-brachyhaline Verhältnisse (Salz-

gehalte zwischen 16-30 ‰ (Hiltermann, 1963). In dieser Fazies sollte die Ausflockung ehemaliger Süßwassersuspensionen, z.B. der Elbe, abgeschlossen sein; denn die Dispersion (Maximum bei ca. 1 ‰) der Tonminerale ist bereits auf ihrem marinen Minimum. Die in dieser Fazies vorherrschenden Na-, Mg- und K-Ionen sorgen aufgrund ihrer hohen Konzentration für eine schnelle Ausflockung und unregelmäßige Ablagerung von Suspensionen, die entsprechend gut permeable Sedimente bilden (Müller, 1964). Dies bedeutet, da die Salinitätsänderungen während einer Tide minimal sind, daß nicht Material erst dispergiert und dann geflockt werden kann. Flockung kann im Büsumer Watt nur dann eintreten, wenn vorher hydromechanisch bei hohen Turbulenzen sehr kleine Einzelpartikel geschaffen wurden, die dann bei niedriger Turbulenz des Wassers, z.B. während der Kenterphasen, wieder zu größeren Partikeln zusammenlagern und dann schneller abgesetzt werden können. Flockung unterstützt also durch Schaffung größerer Komplexe den "scour lag".

Die EDAX-Analysen liefern einen Hinweis auf mögliche Differenzierung der Tonminerale zwischen Sediment und Suspension: In der Suspension wurde keine Korrelation zwischen K und Al gefunden, die aber in den Wattsedimenten sehr deutlich ist. Dies würde bedeuten, daß die auf der Wattoberfläche befindlichen Illite schlechter in Suspension zu bringen sind als andere Tonminerale. Tonminerale zeigen bezüglich ihrer Austauschkapazität, der Fähigkeit, Ionen auf der Oberfläche zu adsorbieren, große Unterschiede: Die Reihenfolge zu höheren Kapazitäten ist: Kaolinit, Illit, Chlorit und Montmorillonit (Förstner und Wittmann, 1979). Dies bedeutet, daß Montmorillonit erst bei sehr

viel höheren Salinitäten geflockt wird als Kaolinit und Illit, es also leichter zu suspendieren ist als diese beiden Minerale (Whitehouse et al., 1960). Sollte dieser Vorgang im Büssumer Watt zum Tragen kommen, so müßte sich deichwärts der Illitanteil und auch der Kaolinitanteil an den Tonmineralen erniedrigen und damit der K-Gehalt. In den EDAX-Kurven deutet sich eine solche Tendenz an (Abb. 4), doch müßten hier detaillierte mineralogische Untersuchungen einsetzen.

Auch die Humussäuren besitzen sehr hohe Austauschkapazitäten (Förstner und Wittmann, 1979) und sind daher geeignete Kandidaten, um sie in Suspension zu bringen. Dies könnte einer der Gründe dafür sein, daß das "erste Wasser" in der Lage ist, eine so große Menge organischer Substanz von der Wattoberfläche zu lösen. Die dann mit Berührung mit genügend Kationen des Seewassers einsetzende Flockung und schrittweise Adsorption an Tonminerale sorgt bei der ruhigen Stromkenterung für eine bevorzugte Sedimentation und könnte erklären, warum auch die Gangkurve der gelösten organischen Substanz (C_{org} in Abb. 2 z.B.) Asymmetrie zeigt.

Zur Festlegung der herantransportierten Suspension und auch des gelösten organischen Materials tragen auch biologische Prozesse bei. Filtrierer entziehen dem Wasser die Suspension und gelöste organische Substanzen. Die Raten, mit denen z.B. *Cardium edule* Wasser durchsetzt, sind erstaunlich und sicher für die Sedimentbildung signifikant. Zahlen sind in den Berichten der Arbeitsgruppe Thiel (Großmann und Spychalla, 1980) dieses Projektes nachzulesen.

Um sich eine Vorstellung von der Größenordnung des landwärtigen Netto-Transportes zu verschaffen, wurden die Suspensionsdaten vom 21.9.1978 für eine Modellberechnung verwendet. Da für die Meßplattform keine Strömungsmessungen vorliegen, wurde vereinfachend angenommen, Flut und Ebbe führten das Wasser parallel zu Profil II land- bzw. seewärts. Aus der Morphologie des Profils ergibt sich die Wassermenge, die benötigt wird, um das Profil auf einer Breite von einem Meter zu überfluten. Aus der Tidenkurve ergeben sich dann (Modell-) Überströmungsgeschwindigkeiten (s. Tab. 17a) und Gesamtfrachten (Tab. 17b). Die Rechnung ergibt einen landwärtigen Transport von 221 kg Suspension, dem ein seewärtiger Transport von nur 120 kg gegenübersteht. Der landwärtige Netto-Transport betrug also für die Tide vom 21.9. immerhin 101.5 kg (auf einem einen Meter breiten Streifen!). Auf einer Breite von 1 km, also in etwa entsprechend dem Testgebiet zwischen den Profilen I und II in Büsum ergäbe sich eine Netto-Sedimentation von 100 t!

Berechnet man in gleicher Weise die Fracht an C_{org} und Zuckern aus den Analysenwerten, so erhält man Netto-Werte von 5.1 kg C_{org} und 1.56 mol Zucker, entsprechend 280 g bzw. 112 g Zucker- C_{org} oder 2.2 % des sedimentierten C_{org} . Von den mit der Flut herant transportierten Mengen bleiben 46 % der Suspension, 35 % des gelösten C_{org} und 22 % des Zuckers auf dem Profil zurück. Die Zahlen mögen eine Vorstellung von der Effektivität der physiko-chemischen Vorgänge und der Wattorganismen geben, das durch die Flut angebotene Substrat zurückzuhalten. Rechnet man die Zucker in Kcal um, ergibt sich für die Flut vom 21.6.1978 ein Wert von 1050 Kcal, der auf einem Meter Breite im Büsumer Watt von den Organismen in Form von Zucker umgesetzt wurde.

Es ist selbstverständlich, daß diese Werte nur Modellcharakter haben können. Folgende Einschränkungen sind zu machen: 1. ist der Strömungsweg eines einzelnen Wasserpakets im Büsumer Watt komplizierter als die hier angenommene Profilparallelität, 2. sind die Analysen mit Ungenauigkeit behaftet, so fehlt z.B. der C_{org} - und der Zuckerwert des letzten Wassers, und 3. ist dies nur eine Meßreihe bei einer bestimmten Wetterlage und zu einer bestimmten Jahreszeit. Der Blick auf die Kurven der anderen Analyseserien zeigt, daß zu anderen Bedingungen und Zeiten Form und Höhe der Kurven stark differieren können. Dennoch geben die Zahlen eine Vorstellung der Größenordnung des Netto-Transportes, auf das Jahr hochgerechnet müssen wir mit der Anlieferung von Tausenden von Tonnen Suspension, Hunderten Kilogramm gelöster organischer Substanz und Hunderten Mol gelöster Zucker in das Büsumer Testgebiet rechnen.

Die Erfassung des Netto-Transportes ist eine der schwierigsten Aufgaben der Wattforschung. Vergleichbare Daten, insbesondere des C_{org} -Transportes, sind mir nicht bekannt, mit Ausnahme der Untersuchung von Shisler und Jobbins (1977) in Prielen der Salzmarsch New Jerseys. Sie stellten im Sommer Netto-Verluste an organischer Substanz fest. Sowohl die DOC wie das partikuläre C waren in den Ebbwässern signifikant höher als im vom Meer hereindrückenden Flutwasser. Das Flutwasser war offenbar zuvor nicht über eine freie Wattfläche gelaufen, so daß die Aufnahme von organischer Substanz in diesem Fall erst landwärtig des Meßpunktes erfolgte und im rückflutenden Wasser sichtbar wurde. Leider diskutieren die Autoren die Herkunft und den Verbleib des DOC und des POC nicht.

Modell-Netto-Transport-
Betrachtet man die [^]Mengen, so drängt sich die Frage nach dem
Woher der Stoffe auf. Als Quellen kommen in Frage:

1. Fluviatile Suspensionen
 - a) der Elbe (im Mittel 1966-73:
840 000 t/a, Kempe et al., 1980)
 - b) der Abflüsse in die Meldorfer Bucht
 - c) aus Kläranlagen (die Büsumer Anlage
hat ihren Auslaß ganz in der Nähe)
2. Marine Erosion
 - a) des holozänen Kleis
 - b) des Wattsedimentkörpers selbst
3. Marine Produktion
 - a) DOC und POC aus gelöstem CO_2 und
 HCO_3^- (Primärproduktion) und den
Nährstoffen
 - b) Diatomeen aus gelöstem SiO_2
 - c) Kalkschaler aus gelöstem Ca^{++} , HCO_3^- ,
 CO_3^{--}

4. Von der gerade überströmten Wattoberfläche selbst (Recycling)

Selbstverständlich muß jedes endgültig abgelagerte Suspensionspartikelchen und jedes organische Molekül im Wasser irgendwann einmal aus den Quellen 1-3 geliefert sein, die aktuelle Höhe der Suspensionsfracht wird durch Quelle 4 entscheidend beeinflusst. Wenn die Sedimentaufnahme von der gerade überströmten Wattfläche nicht stattfände, so könnte das anströmende Flutwasser für alle Parameter nur konstante Werte zeigen, und erst das Ebbwasser hätte aufgrund der inzwischen erfolgten Festlegung verringerte Gehalte. Das Konzept des Transportes durch "Bläschen-Lifting" im "ersten Wasser" beruht aber auf der Aufnahme von der Wattoberfläche.

Bei dem Umfang, den die Suspensionstransporte im Watt besitzen, wäre aber nach wenigen Tiden bei ruhigem Wetter die seeseitige Wattoberfläche von feinen Stoffen befreit, wenn hier nicht feine Substanz durch die Wattorganismen selbst an die Wattoberfläche geliefert würden. Die Untersuchungen der Kotpillen zeigten, daß sie keine Sandkörner enthalten. Die Sedimentfresser fördern also ständig Silt und Ton aus dem Wattsand an dessen Oberfläche. Dies bildet das Substrat für Diatomeen, Algen, Pilze und Bakterien, die die Kotpillen im Verein mit periodischer Austrocknung und Wellenbewegung zersetzen. Bei Flut wird dieses Substrat dann mittels "Bläschen-Lifting" aufgenommen und landwärts transportiert, um dort einen immer mächtigeren Schlickkörper zu bilden. Abb. 17 stellt diesen Vorgang schematisch dar, der das Watt immer stärker in Sandwatt - prielseitig - und

Abb. 17

Schlickwatt - landseitig - differenziert. Die Zone der Entschlickung entspricht in ihrer Tiefe dem Aktionsradius der Kotpillenerzeuger.

Entgegengewirkt wird dieser Entschlickung in gewissem Umfang durch die Festlegung neuer Suspension durch Filterfeeder. Der Hauptmechanismus, der für eine Neuverteilung der feinen Substanz sorgt, scheint mir aber in Sturmfluten zu bestehen. Sie sind in der Lage, durch hohe Wellenenergie nicht nur den Schlick zu suspendieren, sondern auch den Sand zu bewegen. Der Schlick wird zum Teil in die offene See rücktransportiert und zum anderen Teil in den Sand zurückgemischt, und die Differenzierung des Watts beginnt bei ruhigem Wetter von neuem. Dieses Recycling der feinen Substanz wird durch die Beobachtungen der Korngrößenverteilungen auf den Schnitten in Cuxhaven und Büsum substantiiert. Dort wurde festgestellt (Siefert, 1979; Gast, 1980), daß ruhiges Wetter eine Verfeinerung der Korngrößen auf den Profilen zur Folge hatte, während Stürme die Spektren zur gröberen Seite verschoben.

Da sich bei stürmischer See bekanntlich marine Prozesse nur schlecht oder gar nicht messen lassen, wird auch die oben beschriebene Rückmischung bis auf weiteres meßtechnisch nicht erfaßbar sein.

Der durch die physikalischen, chemischen und biologischen Vorgänge sedimentierte und in großem Umfang immer wieder recycelte und neu sich bildende Schlick ist, wie die elektronenmikroskopischen und organo-chemischen Untersuchungen gezeigt haben, nun nicht einfach eine lose Anschwemmung feiner Partikel, sondern ein durch "klebrige" organische Substanz zusammengebundenes Netzwerk.

Die Vernetzung erfolgt durch die organische Substanz, die sich wie eine Haut über die Partikel legt und auch amorphe Stränge zwischen Körnern bilden kann. In dieser organischen Substanz ist der Anteil an Zuckern sehr gering, nach den hier vorgelegten Untersuchungen ca. 0.5 %, bezogen auf den Kohlenstoff. Der "Nahrungswert" des Schlicks ist daher gering. Darauf weisen auch die hohe Konzentration von Xylose und Arabinose hin, wenig am Stoffwechsel teilnehmende Kohlenhydrate, während die wertvollen Zucker Glukose und Fruktose stark abgereichert erscheinen. Dieses geringe Nahrungsreservoir wird durch das in die während der Ebbe leergefallenen Porenräume eindringende und mit von der Wattoberfläche aufgenommenen organischen Substanzen angereicherte "erste Wasser" möglicherweise erheblich aufgebessert. Diese periodische Nachlieferung organischer Substanz dürfte nicht nur der im Schlick lebenden Makrofauna, sondern vor allem auch der Mikrofauna, den Bakterien und Pilzen, zugute kommen. Andererseits wird die ständige Nachlieferung organischer Verbindungen zur immer komplexeren Vernetzung der Partikel führen, die dann makroskopisch die typische Klebrigkeit des Schlicks zeigen. Anhand der Zuckeranalysen konnte ferner gezeigt werden, daß Wurmbauten mit Fukose-reichen Verbindungen, den Mucoiden, verzweigten Glykoproteinen, ausgekleidet sind. Diese Verbindungen, die auch die Kotpillen umgeben dürften, haben aufgrund ihrer molekularen Struktur den Charakter von Schleimen. Diese von den Wattwürmern produzierten Schleime dürften eine noch näher zu untersuchende Rolle in der Schlickgenese spielen.

Um die hier angeschnittenen Fragen ^{nach} der Art organischer Substanz im Schlick und deren Bedeutung für die Schlickgenese weiter zu verfolgen und die Untersuchungen auch auf die zweite wichtige und analysierbare Stoffgruppe, die Proteine, zu erweitern, werden zur Zeit am Geologisch-Paläontologischen Institut drei Diplomarbeiten durchgeführt.

Aus der Diskussion der Schlickbildung auf den freien Wattflächen läßt sich auch ein Verständnis der Verschlickung in Häfen ableiten. Allein die Verringerung der Stromgeschwindigkeit, die die Flut erfährt, wenn sie die engen Einfahrtöffnungen der Schleusen passiert hat, führt zu einer erheblichen Abnahme der Turbulenz. Dies erlaubt nicht nur die Sedimentation größerer Partikel, sondern führt auch zur Flockung kleiner Partikel zu größeren Komplexen, die eben durch die ~~verminderte~~ Turbulenz nicht mehr getrennt werden. Wir haben gesehen, wie effektiv schon die freien Wattflächen die Suspension abzufangen vermögen. Größere Becken mit kleinen Einlässen sind dann wirkliche Sedi-mentfallen. Die Messungen an der Speicherkoogschleuse zeigen darüber hinaus, daß Häfen mit ihren ruhigen Wasserverhältnissen jahreszeitlich viel früher Planktonblüten erleiden und so zusätzliche Substanz selbst produzieren. Dieser Vorgang wird um so häufiger und heftiger sein, je mehr Nährstoffe dem Hafen zugeführt werden. Hereindrückendes Grundwasser (Hafen des Speicherkoogs!), zusitzende Abwässer und verschmutzte Wasserläufe erneuern verbrauchte Nährstoffe ständig. Wegen der geringen Turbulenz im Hafen können die Blüten besonders schnell ablaufen und maximale Produktionen erreichen. Drückt jetzt frisches

Meerwasser hoher Salinität bei Flut nach, kann die gesamte Blüte getötet und durch Ausflockung bei erhöhtem Salzgehalt schnell sedimentiert werden. Auf den freien Wattflächen wird der Schlick durch Sturmfluten und in Schlechtwetterperioden hoher Wellenenergie in den Sand zurückgemischt; in den Häfen, die dann durch Schleusen geschützt sind, ist dieses Recycling unterbunden. Schlickbildung in Häfen ist ein unvermeidlicher natürlicher Prozeß, der allein schon durch die Morphologie des Hafens beschleunigt wird. Vermindern kann man die Schlickbildung durch bauliche Maßnahmen, indem man Zuleitung von Nährstoffen mit Ab- und Flußwässern unterbindet oder die Hafenbecken gegen Grundwasser abdichtet. Schlickfrei werden Häfen erst dann, wenn sie von schnellen Flut- und Ebbströmen durchflossen werden können, also von Sackgassen in doppel befahrbare Durchgangsstraßen umgewandelt werden!

E. Zusammenfassung

Im Rahmen des interdisziplinären Schlickprojektes des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen wurden 1977-1979 im Büsumer Watt (Meldorfer Bucht, Schleswig-Holstein) elektronenmikroskopische und geochemische Untersuchungen zur Schlickbildung durchgeführt.

Unter dem Elektronenmikroskop läßt sich Schlick in seine Einzelpartikel auflösen, er besteht zum großen Teil aus Tonmineralen, Diatomeen- und Zellmembranresten sowie Partikeln von Kalkschalen und fein verteilten Eisenverbindungen. Die organische

Substanz spielt eine große Rolle bei der Verkittung der Körner miteinander. Die organische Substanz ist extrem an Kohlenhydraten abgereichert (Zuckergehalte um 0.5 % der C_{org} -Konzentration), für Organismen wenig verarbeitbare Monosaccharide wie Xylose reichern sich an. Wattwürmer produzieren Fukose-reiche Glykoproteine als Bau-Schleime, die ebenfalls für Vernetzung des Sediments sorgen.

Die Tiden sind der Motor des Sedimenttransports und damit der Schlickneubildung. Insbesondere das erste bei Flut anströmende Wasser nimmt an Sauerstoffbläschen, von Diatomeen und Algen während der Ebbe erzeugt, hängende Partikel auf. Im ersten Wasser finden sich daher die höchsten Suspensions- und Sauerstoffkonzentrationen und die höchsten pH-Werte der gesamten Tide. Gleichzeitig werden auch organische Substanzen gelöst. C_{org} -Gehalte von bis zu 13 mg/l wurden im ersten Wasser gemessen. Insgesamt sind die Gehalte an gelöster organischer Substanz 2-3 mal so hoch wie in der freien Nordsee, 5 % davon sind Zucker. Dieses nährstoffreiche Wasser dringt in die beim Abebben freigefallenen Porenräume und bringt so der Infauna Nahrungsnachschub (vor allem Glukose und Fruktose). Die Pauschalzusammensetzung der Suspension ist im Verlauf der Tide und auch zwischen einzelnen Tiden recht konstant, aber deutlich Al-reicher als die Pauschalzusammensetzung des Sediments. Die bei ruhigem Wetter gemachten Meßreihen zeigen (anhand einer Modellrechnung) signifikante landwärtige Netto-Transporte für Suspension, gelöste organische Substanz und Zucker, die im deichwärtigen Teil der Wattflächen aufgrund hydrodynamischer, chemischer und biologischer

Prozesse als Schlick sedimentiert werden. Im freien Watt dürften Sturmfluten und Tiden hoher Wellenenergie für eine Rückmischung des Schlicks in den Sandwattkörper verantwortlich sein. Der Kreislauf beginnt von neuem, indem Kotpillenbildner sukzessive für eine Entmischung feines Material zur Wattoberfläche fördern, wo es landwärtig abtransportiert werden kann. In Häfen ist dieser Kreislauf unterbunden, es kommt zu irreversiblen Verschlickungen. Messungen zeigen zudem, daß in Häfen Planktonblüten aufgrund stabilerer Wasserschichtung heftiger und früher ablaufen können als im freien Watt und so zu einer noch schnelleren Schlickbildung beitragen.

Literatur

- Bahrenberg, G. und Giese, E. (1975): Statistische Methoden und ihre Anwendung in der Geographie. - 1-308, Teubner, Stuttgart.
- Biggs, R. B. (1978): Coastal Bays. - In: Davis, R. A., Jr. (ed.) "Coastal Sedimentary Environments", 69-99, Springer Verlag, New York, Heidelberg, Berlin.
- Curray, J. R. (1969): Estuaries, lagoons, tidal flats and deltas. - In: Stanley, D. J. (ed.) "New Concepts of Continental Margin Sedimentation", A.G. I., Short Course Lecture Notes, Washington, D.C., 276 pp.
- Dawson, R. and Pritchard, C. G. (1978): Determination of amino acids in seawater using a fluorimetric analyser. - Mar. Chem. 6, 27-40.
- Degens, E. T. and Mopper, K. (1975): Early diagenesis of organic matter in marine soils. - Soil Sci. 119(1), 65-72.
- Eberlein, K. and Hammer, K. D. (1979): Automatic determination of total carbohydrates in sea water. - Fresenius Z. Anal. Chem. (im Druck)
- Förstner, U. and Wittmann, G. T. W. (1979): Metal Pollution in the Aquatic Environment. - Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 480.
- Führböter, A. (1979): Sandbewegung im Küstenraum - Rückschau, Ergebnisse und Ausblick. - In: "Sandbewegung im Küstenraum - Rückschau, Ergebnisse und Ausblick; ein Abschlußbericht". Deutsche Forschungsgemeinschaft, 11-46, H. Boldt, Boppard.
- Gast, R. (1980) (in Vorbereitung)
- Graf, W. H. (1971): Hydraulics of Sediment Transport. - 1-513, McGraw-Hill, New York.
- Groen, P. (1976): On the residual transport of suspended matter by the alternating tidal current. - In: De Vries Klein, G. (ed.) "Holocene Tidal Sedimentation", Benchmark Papers in Geology 30, 220-230, Dowden, Hutchinson & Ross, Inc., Stroudsbury, Penns., reprinted from Netherlands J. Sea Res. 3(4), 564-574 (1967).
- Großmann, M. und Spychalla, H. (1980) (in Vorbereitung)
- Hiltermann, H. (1963): Erkennung fossiler Brackwasser-Sedimente unter besonderer Berücksichtigung der Foraminiferen. - Fortschr. Geol. Rheinland Westfalen 10, 49-53.
- Hjulström, F. (1935): Studies on the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. - Uppsala Univ. Geol. Inst., B, 25, 221-527.

- Ittekkot, V. (1980): Verteilung von gelöstem organischem Kohlenstoff, gelösten Zuckern und Aminosäuren im Fladen- grund, Nördliche Nordsee (FLEX 1976). - Dissertation, Geol.-Paläont.Inst.Univ.Hamburg.
- Karlson, P. (1974): Kurzes Lehrbuch der Biochemie für Mediziner und Naturwissenschaftler. - 1-412, G. Thieme, Stuttgart.
- Kempe, S. (1977): Hydrographie, Warvenchronologie und organische Geochemie des Van Sees, Ost-Türkei. - Mitt.Geol-Paläont. Inst.Univ.Hamburg 47, 125-228.
- Kempe, S. (1979): Carbon in the freshwater cycle. - In: Bolin, B., Degens, E. T., Kempe, S. and Ketner, P. (eds.) "The Global Carbon Cycle", SCOPE 13 Report, 317-342, J. Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto.
- Kempe, S., Mycke, B. und Seeger, M. (1980): Flußfrachten und Erosionsraten in Mitteleuropa, 1966-1973. - Wasser u.Boden. (in Druck)
- Khoo, F. (1978): Measurements of redox-potential, a discussion. - Mitt.Geol.-Paläont.Inst.Univ.Hamburg 48, 51-52.
- Köster, R. (1979): Vortragszusammenfassung Schlickkolloquium 12.9.1979, Mskr. 1-7, unveröff., Kiel.
- Merck, E. (1974): Die Untersuchung von Wasser. - 1-224, Merck, Darmstadt.
- Michaelis, W., Mopper, K., Garrasi, C. und Degens, E. T. (1976): Organische Substanzen im Sediment und Wasser der Hamburger Alster. - In: Caspers, H., Degens, E. T. und Vollbrecht, K. (eds.) "Die Hamburger Alster", Mitt.Geol.-Paläont.Inst. Univ.Hamburg, Sonderband Alster 46, 173-188.
- Mopper, K. (1978): Improved chromatographic separations on anion exchange resins. III. Sugars in borate medium. - Anal.Biochem. 87, 162-168.
- Mopper, K. and Degens, E. T. (1972): Aspects of the biogeo- chemistry of carbohydrates and proteins in aquatic environ- ments. - Techn.Report Woods Hole Oceanographic Inst. 72-68, 1-118, Woods Hole, Mass. (unveröff.)

- Mopper, K. (1980): Carbohydrates in marine environments. Recent developments. - Actes du Coll., CNRS. (in Druck)
- Mopper, K. and Degens, E. T. (1979): Organic carbon in the ocean: nature and cycling. - In: Bolin, B., Degens, E. T., Kempe, S. and Ketner, P. (eds.) "The Global Carbon Cycle", SCOPE 13 Report, 293-316, J. Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto.
- Müller, P. J. (1977): C/N ratios in Pacific deep-sea sediments: effect of inorganic ammonium and organic nitrogen compounds sorbed by clays. - *Geochim. Cosmochim. Acta* 41, 765-776.
- Müller, W. (1964): Unterschiede in den chemischen und physikalischen Eigenschaften von fluviatilen, brackischen und marinen Sedimenten. - In: Straaten, L. M. J. U. van (ed.) "Deltaic and Shallow Marine Deposits". Developments in Sedimentology 1, 293-300, Elsevier Pub. Comp., Amsterdam, London, New York.
- Postma (1967): Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment. - In: Lauff, G. H. (ed.) "Estuaries", A.A.A.S. Pub. 83, 158-179, Washington, D.C.
- Postma (1976): Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea. - In: De Vries Klein, G. (ed.) "Holocene Tidal Sedimentation", Benchmark Papers in Geology 30, 176-190, Dowden, Hutchinson & Ross, Inc., Stroudsbury, Penns., reprinted from Netherlands J. Sea Res. 1(1,2), 148-190 (1961).
- Reineck, H.-E. (ed.) (1970): Das Watt, Ablagerungs- und Lebensraum. - 1-142, Waldemar Kramer, Frankfurt a.M.
- Schmidt, R. (1976): Das Küstenholozän der östlichen Meldorfer Bucht und angrenzender Marschen in Dithmarschen, Schleswig-Holstein. - *Meyniana* 28, 69-85.
- Shisler, J. K. and Jobbins, D. M. (1977): Tidal variations in the movement of organic carbon in New Jersey salt marshes. - *Mar. Biol.* 40, 127-134.
- Siefert, W. (1979): Zusammenstellung der wichtigsten Meßdaten und Untersuchungsergebnisse 1964/77 aus dem Sahlenburger Watt. - Studie 41, 1-6, 63 Abb., Strom- u. Hafenbau Hamburg, Forschungs- und Vorarbeitenstelle Neuwerk.
- Stumm, W. and Morgan, J. (1970): Aquatic Chemistry. - 1-583, Wiley, New York, London, Sydney, Toronto.
- Sverdrup, H. U., Johnson, M. W. and Fleming, R. H. (1942): The Oceans, their Physics, Chemistry and General Biology. - 1-1087, ed. 1970, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.

- Van Straaten, L. M. J. U. and Kuenen, P. H. (1976): Accumulation of fine grained sediments in the Dutch Wadden Sea. - In: De Vries Klein, G. (ed.) "Holocene Tidal Sedimentation", Benchmark Papers in Geology 30, 150-175, Dowden, Hutchinson & Ross, Inc., Stroudsbury, Penns., reprinted from Geol.en Mijnbouw 19, 329-359 (Aug. 1957).
- Whitehouse, U. G., Jeffrey, L. M. and Debrecht, J. D. (1960): Differential settling tendencies of clay minerals in saline waters. - Proc. 7th Nat.Conf.on Clay and Clay Minerals, Nat.Acad.Sci.Nat.Res.Council, Washington, D.C., 228 pp.
- Wirth, H. (1980): Sedimentologie und Geochemie von Elbeschwebstoffen zwischen Schnackenburg und Hamburg. - Diplomarbeit, Geol.-Paläont.Inst.Univ.Hamburg, 128 pp. (unveröff.)

Verzeichnis der Abbildungen

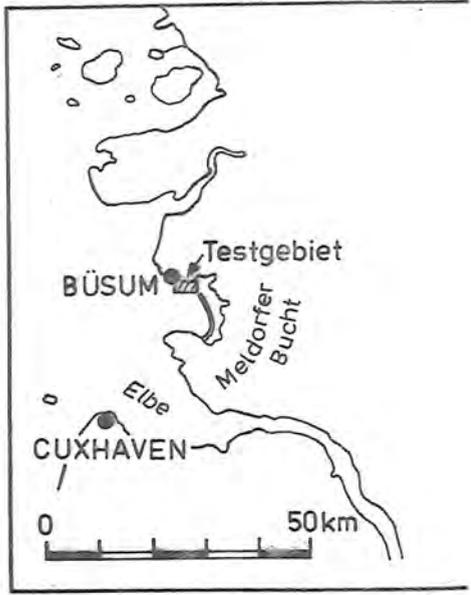
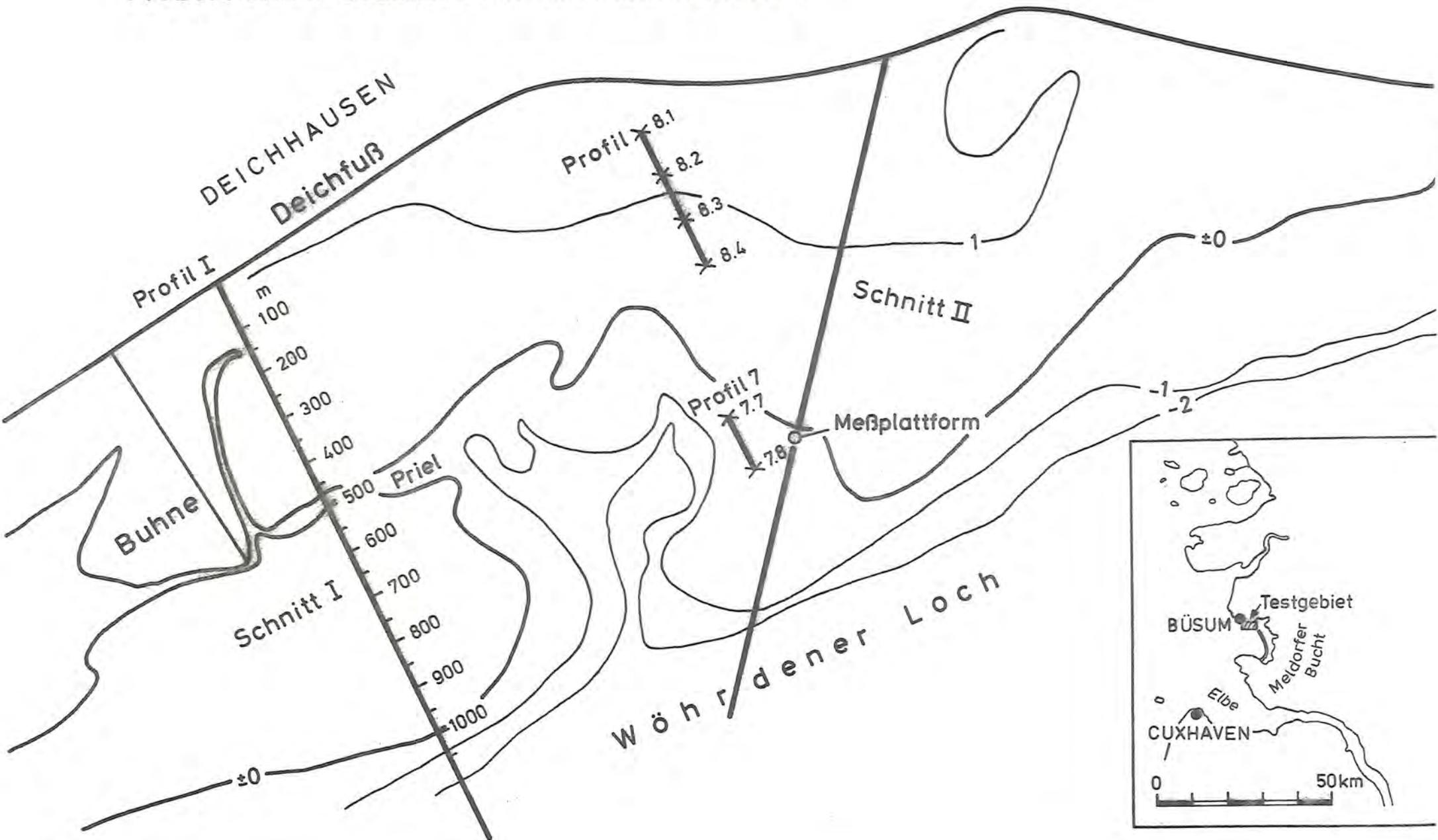
- Abb. 1 Lageplan Testgebiet Büsum
- Abb. 2 Flachseismik-Aufnahme einer Querung des Kronenlochs. Weitere Erläuterung s. Text.
- Abb. 3 Flachseismik-Aufnahme einer Querung des Wöhrdener Lochs. Weitere Erläuterung s. Text.
- Abb. 4 EDAX-Zusammensetzung der Oberflächen-Wattsedimente auf Schnitt I, Büsum, 21.6.1979. Abstand der Probenpunkte 50 m, Morphologie des Profils unten, pH- und Eh-Werte der obersten Zentimeter oben.
- Abb. 5 Kohlenwasserstoffchromatogramm von Schlickwasser, 21.6.1979, Schnitt II, Deichfuß. Erläuterung s. Text.
- Abb. 6 Lageplan des Dithmarscher Speicherkoog-Sielbauwerks. Probennahme erfolgte an der Molenspitze zwischen Siel- und Schleusenauslaß.
- Abb. 7 Hydrochemische Parameter der Tide vom 21.9.1978, Büsum, Meßplattform.
- Abb. 8 Hydrochemische Parameter der Tide vom 19.10.1978, Büsum, Meßplattform.
- Abb. 9 Hydrochemische Parameter der Tide vom 10.4.1979, Speicherkoog-Schleuse.
- Abb. 10 Hydrochemische Parameter der Tide vom 21.6.1979, Büsum, Meßplattform.
- Abb. 11 Korrelationen der Proben 1 (12.30), 4 (14.00), 7 (15.30), 11 (17.30), 14 (19.00) mit allen anderen Proben der Serie vom 21.9.1978. Erläuterung s. Text.
- Abb. 12 Kombisondenkurven vom 21.6.1979. Der Sondenkopf war am Fuß der Meßplattform befestigt. Erläuterung s. Text.
- Abb. 13 EDAX-Zusammensetzung der Suspensionsproben vom 19.10.1978, Büsum, Meßplattform. Beachte die Konstanz der Zusammensetzung während der Tide.
- Abb. 14 EDAX-Zusammensetzung der Suspensionsproben vom 10.4.1979, Dithmarscher Speicherkoog-Schleuse. Beachte die leichte

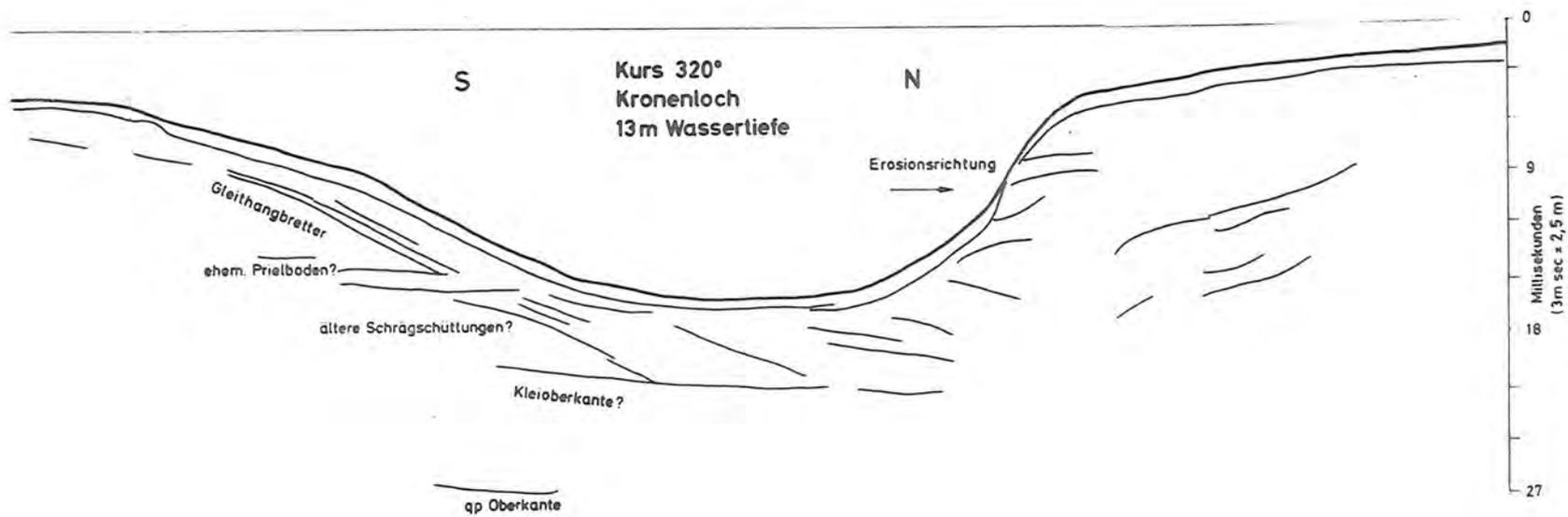
Zunahme des Si und Abnahme des Al ab 17.30, hier macht sich die Diatomeenblüte im ausfließenden Hafenwasser bemerkbar.

- Abb. 15 Röntgenbeugungsspektren verschiedener Suspensionen.
- Abb. 16 Anzahl der Sandkörner auf den Filtern vom 21.9.1978 und 19.10.1978, Büsum, Meßplattform.
- Abb. 17 Schema der Differenzierung des Mischwatts in Sandwatt und abzutransportierende feine Substanz durch Wattorganismen.

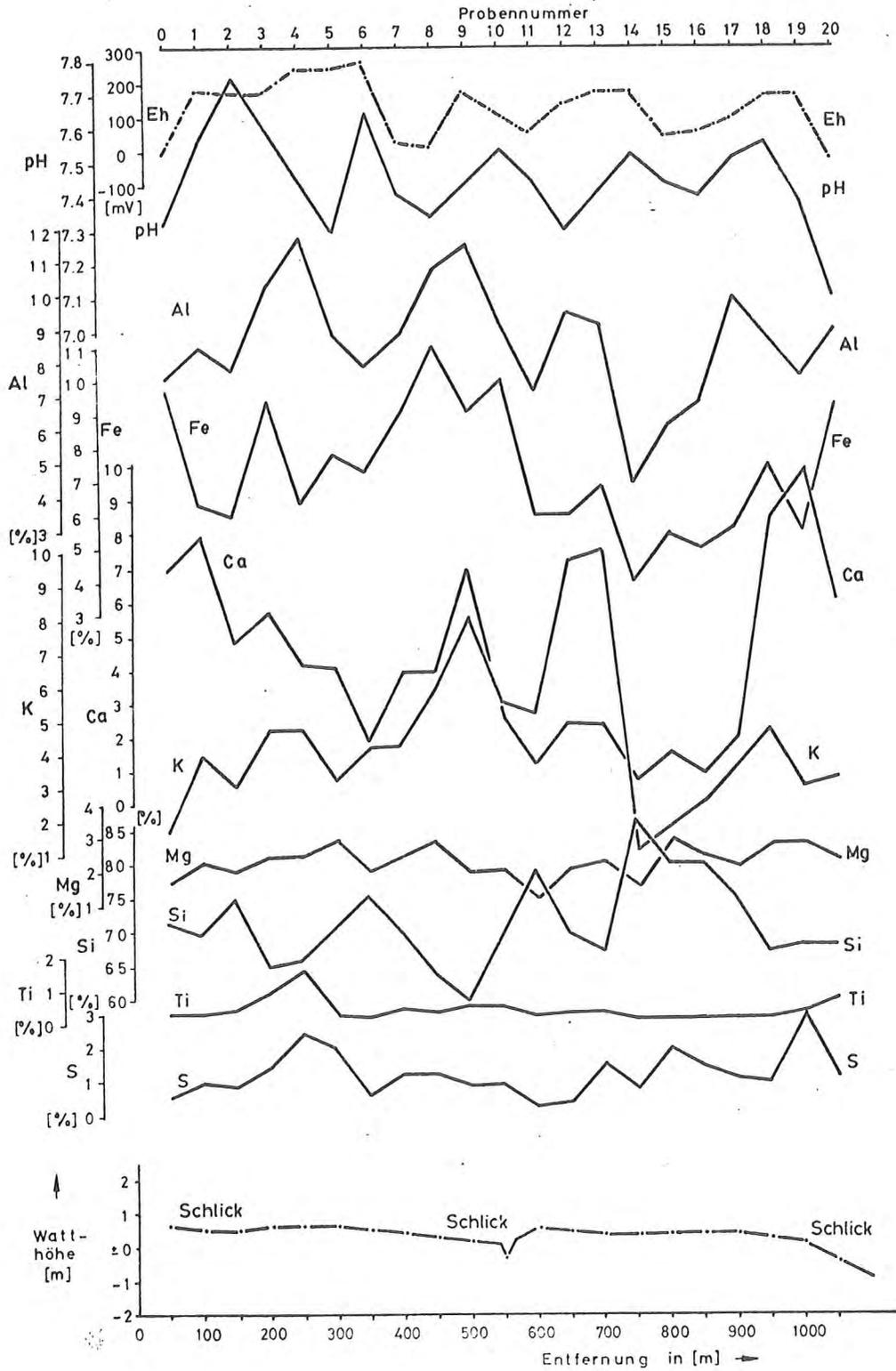
Lageplan der Probenpunkte im Büsumer Watt

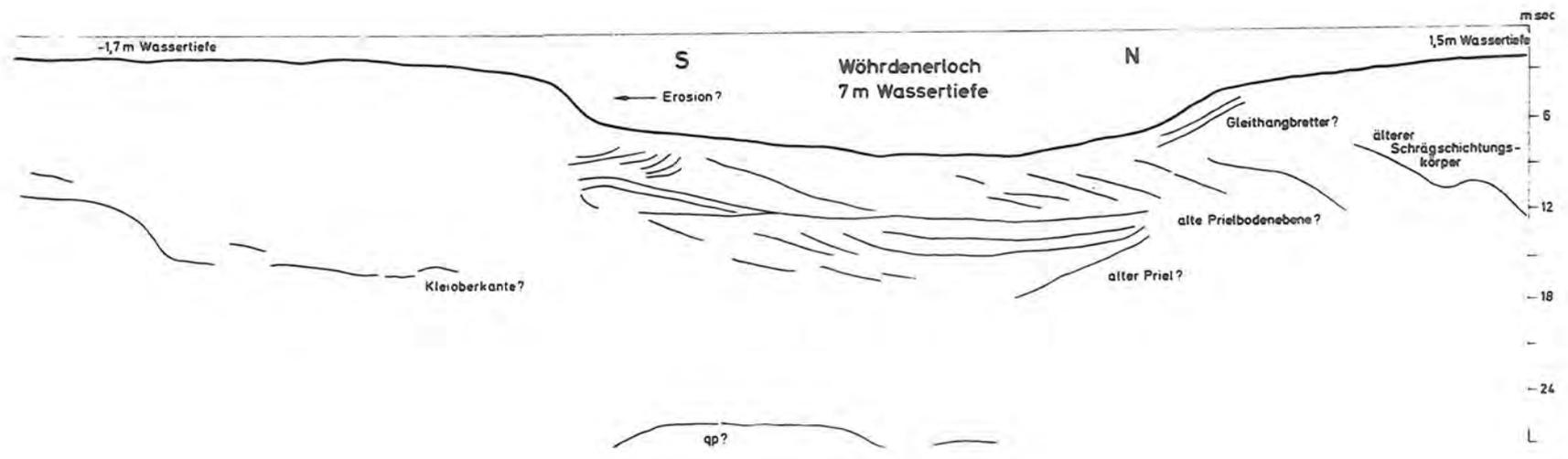
Probennahme Sediment 21./22. 3. und 21. 6. 1979





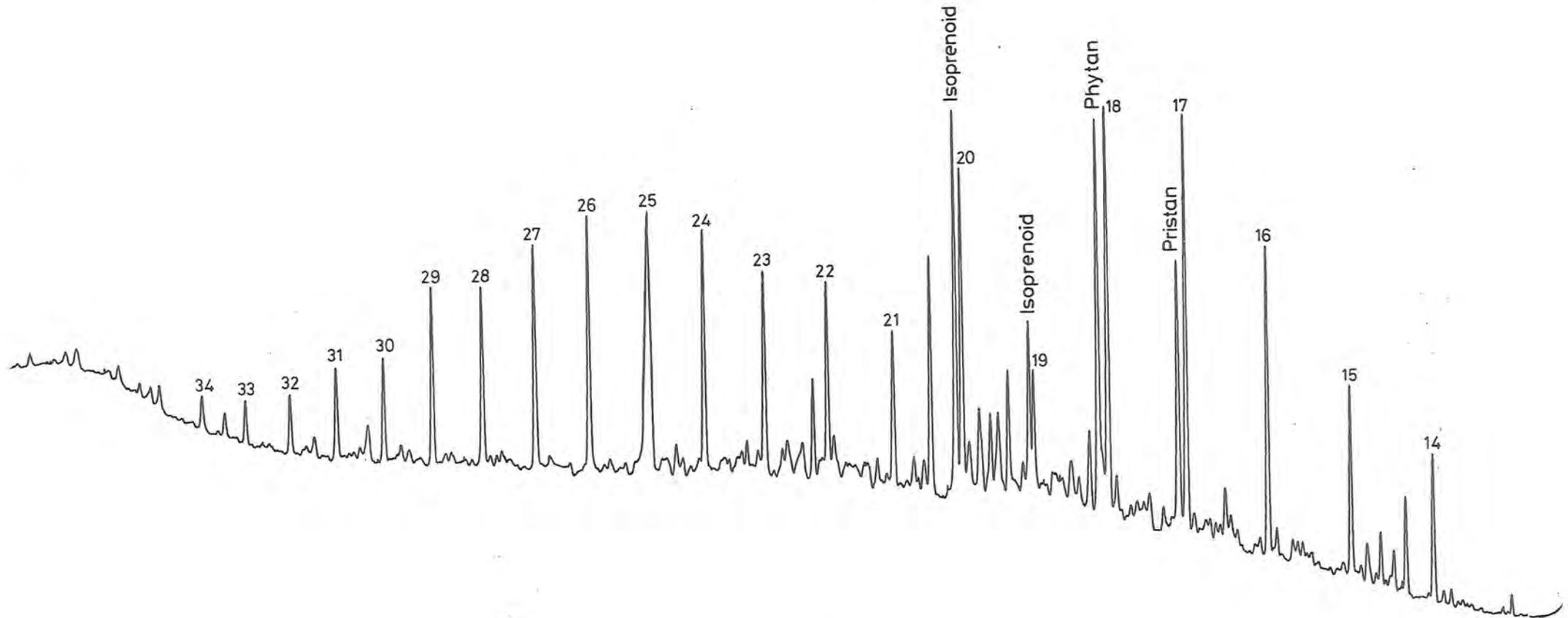
EDAX - Analysen Büsum Profil I 21.6.1979

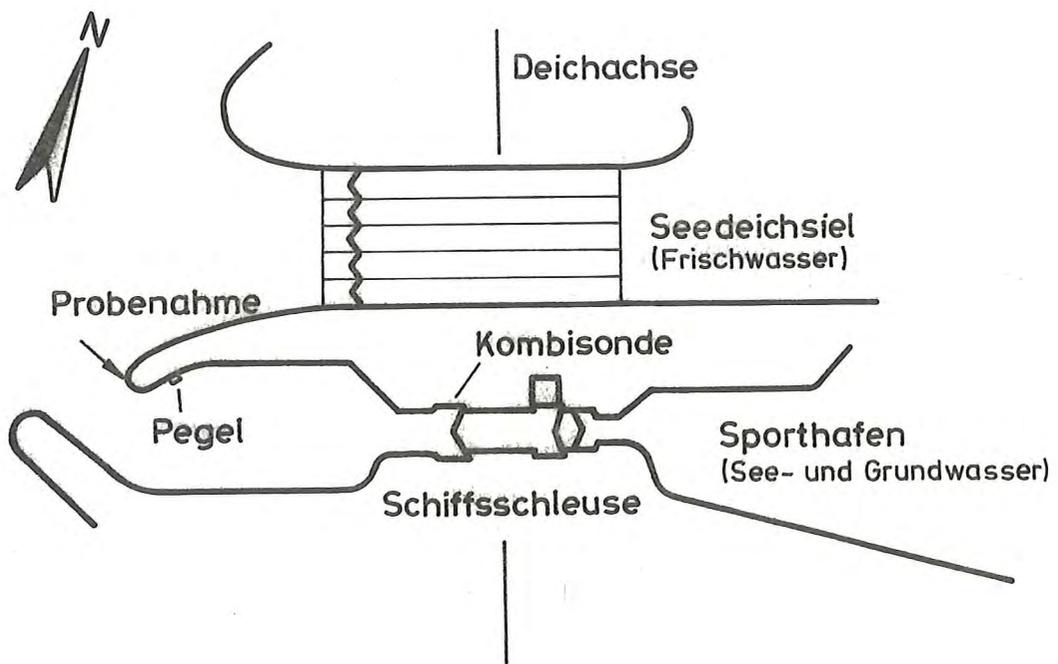




Büsum Schnitt I, 21. 6. 79
Kohlenwasserstoff-Spektrum des Schlickwassers

Glas-Kapillarsäule SE 30
35 m, Ø 0,3 mm, N₂
80 - 300°C, 4°/min

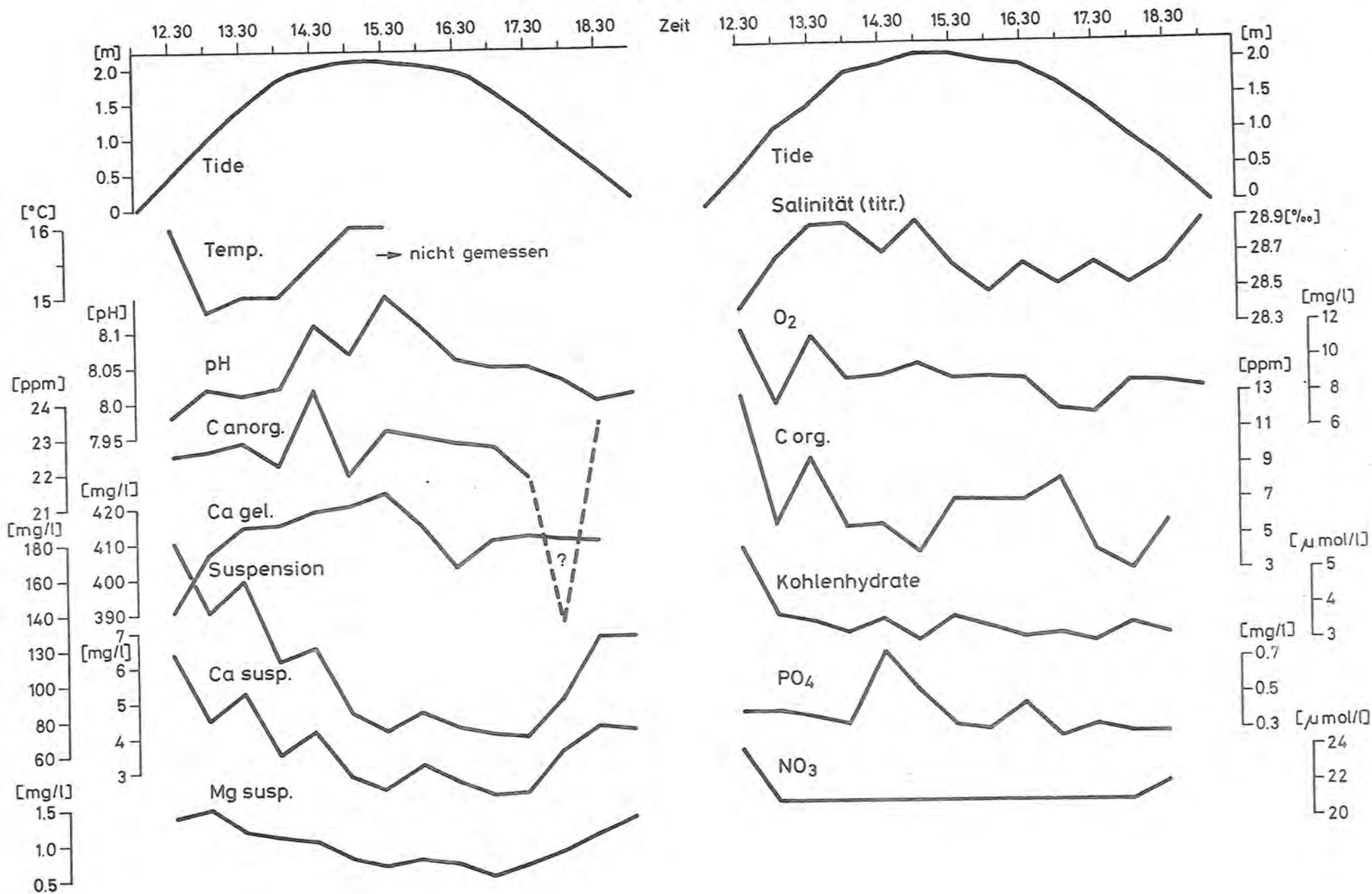




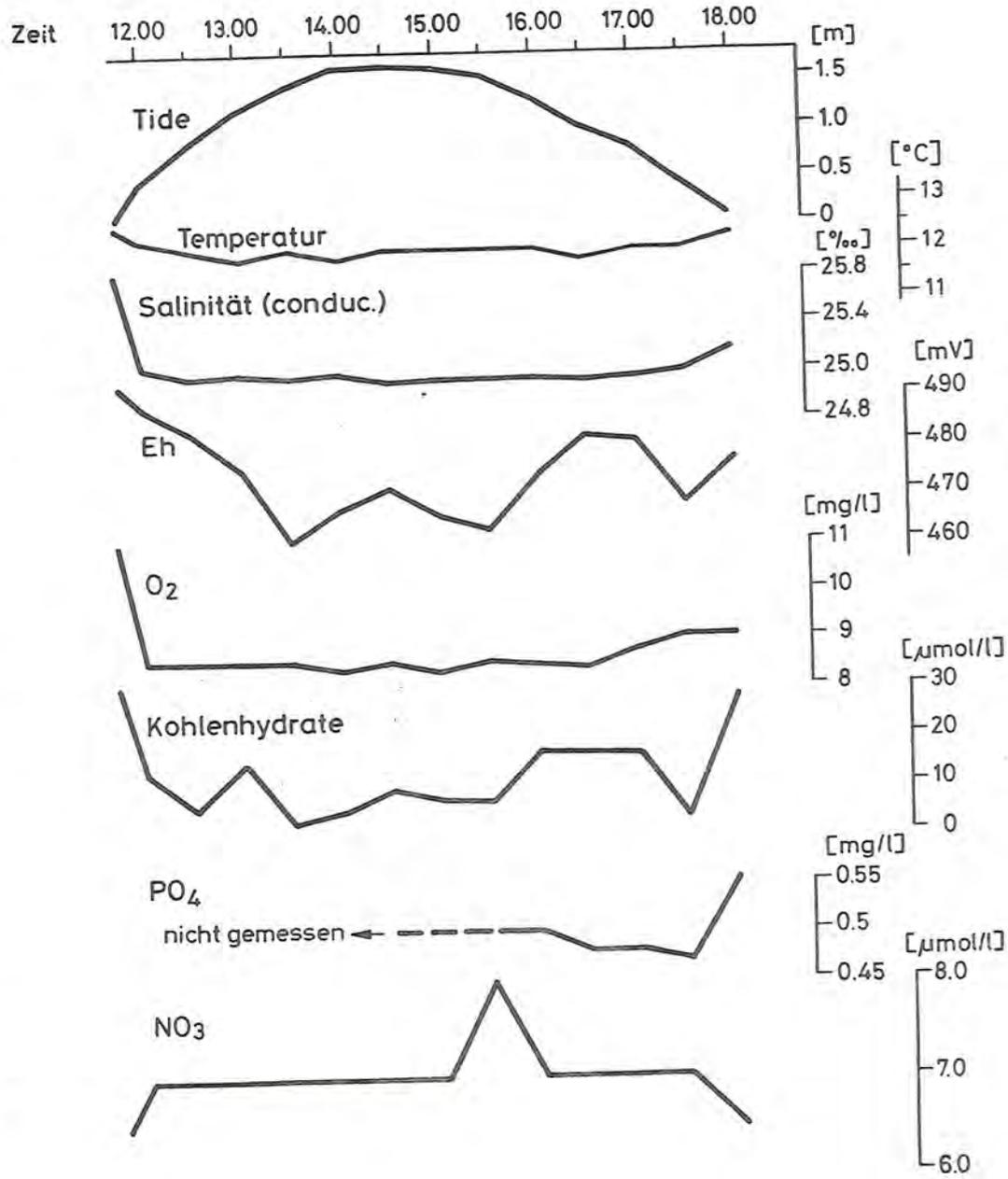
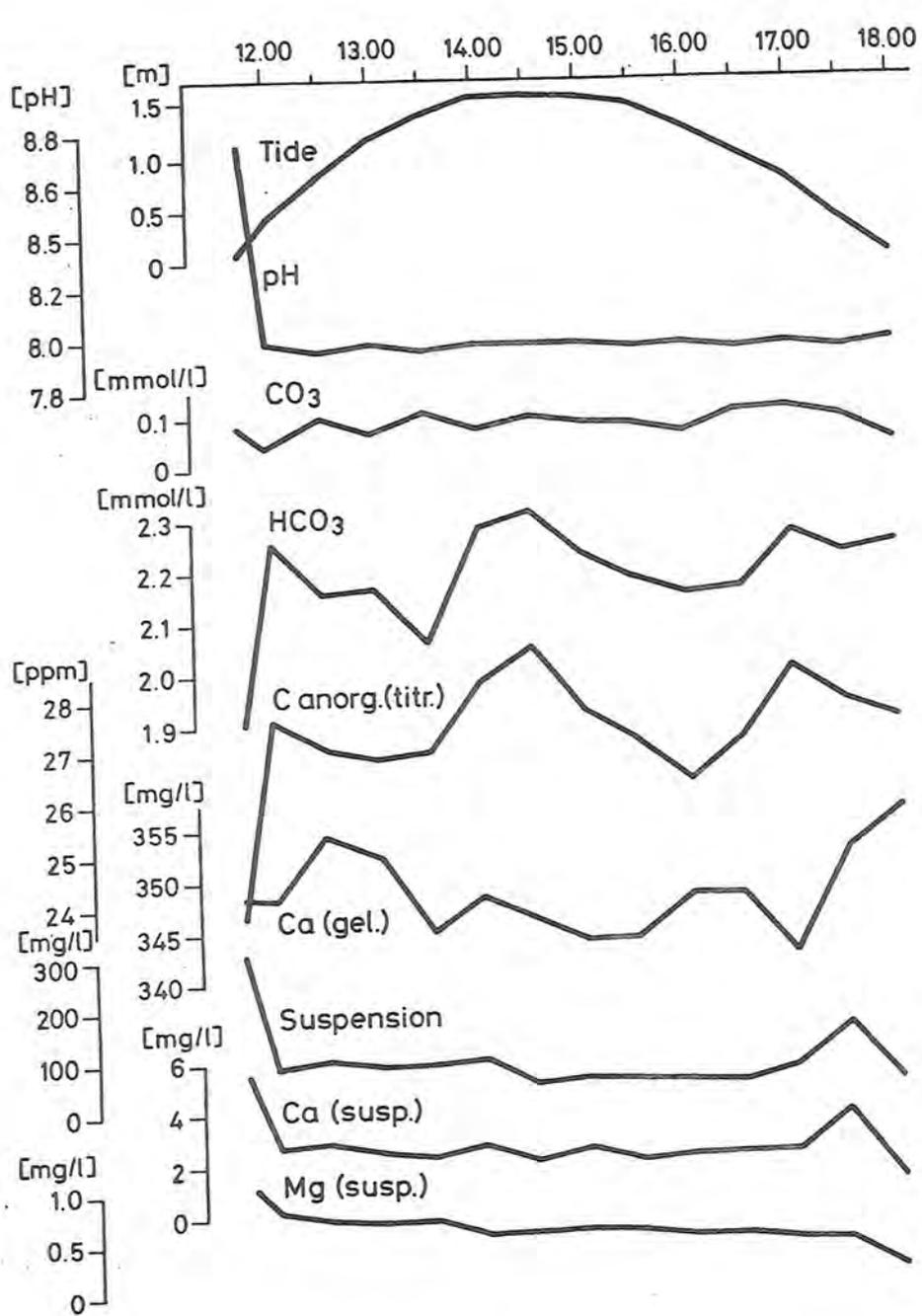
Sielbauwerk Speicherkoog Dithmarschen
 Nord

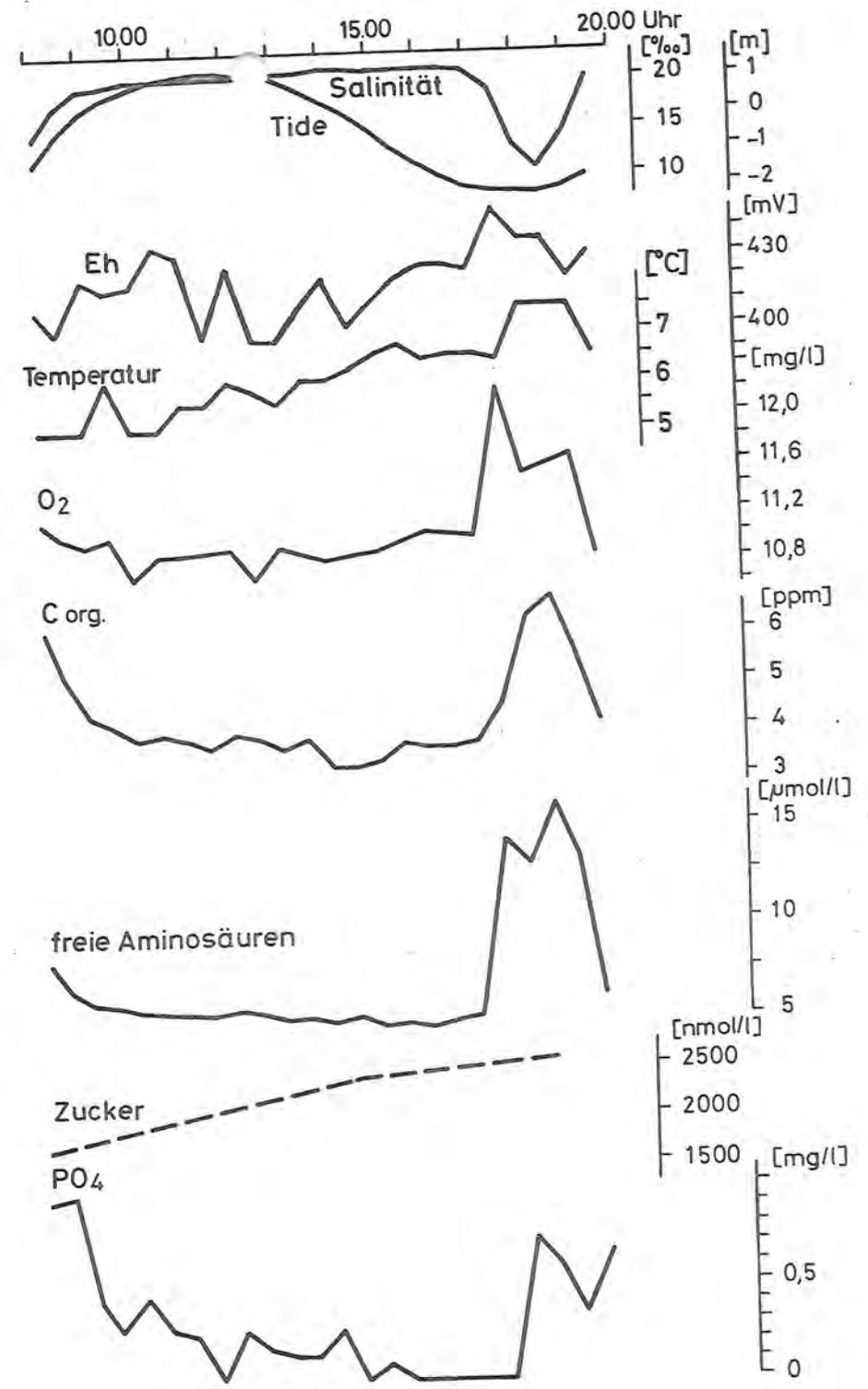
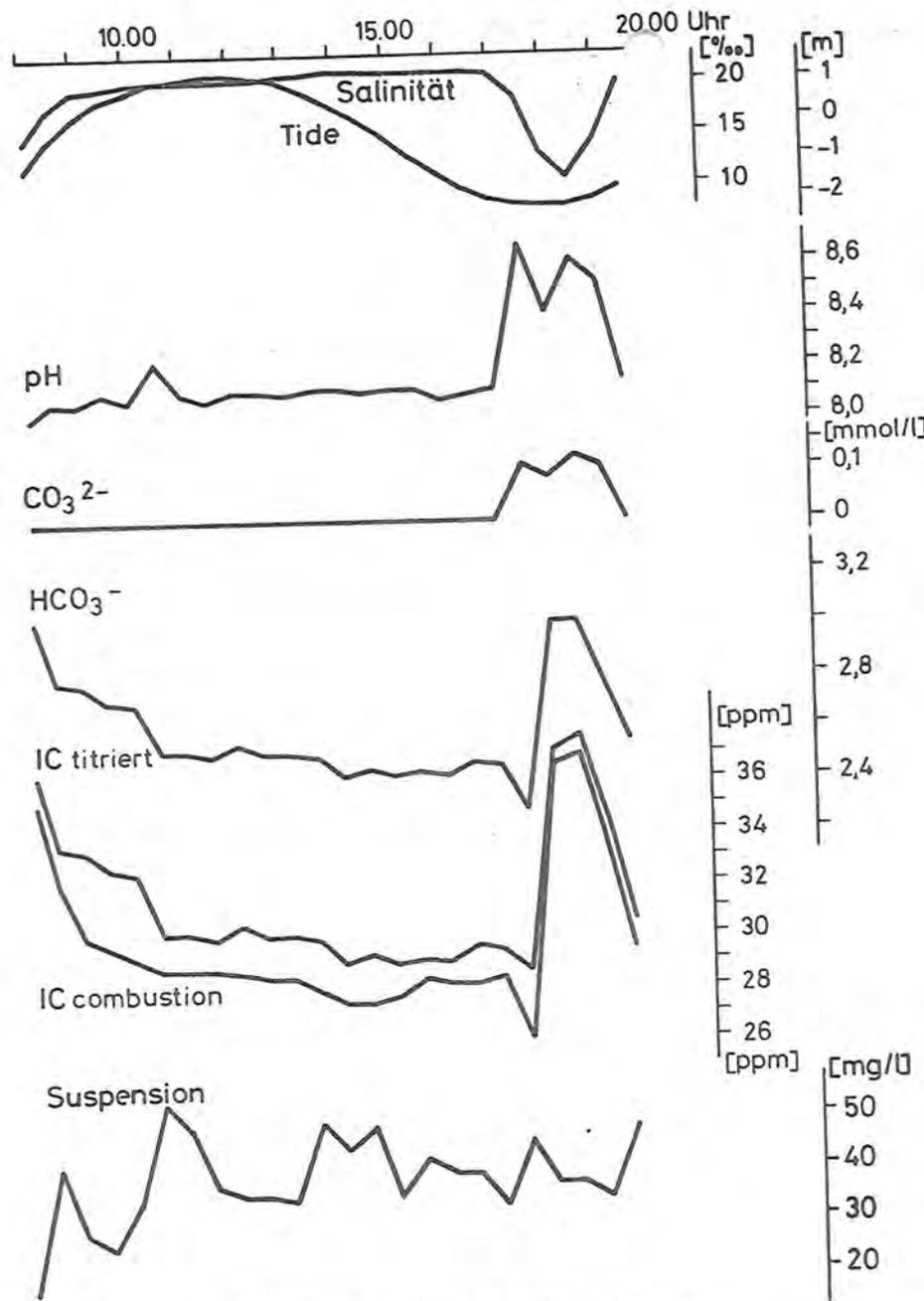
Pegelnull = -5 m NN

Büsum Meßplattform, 21. 9. 78



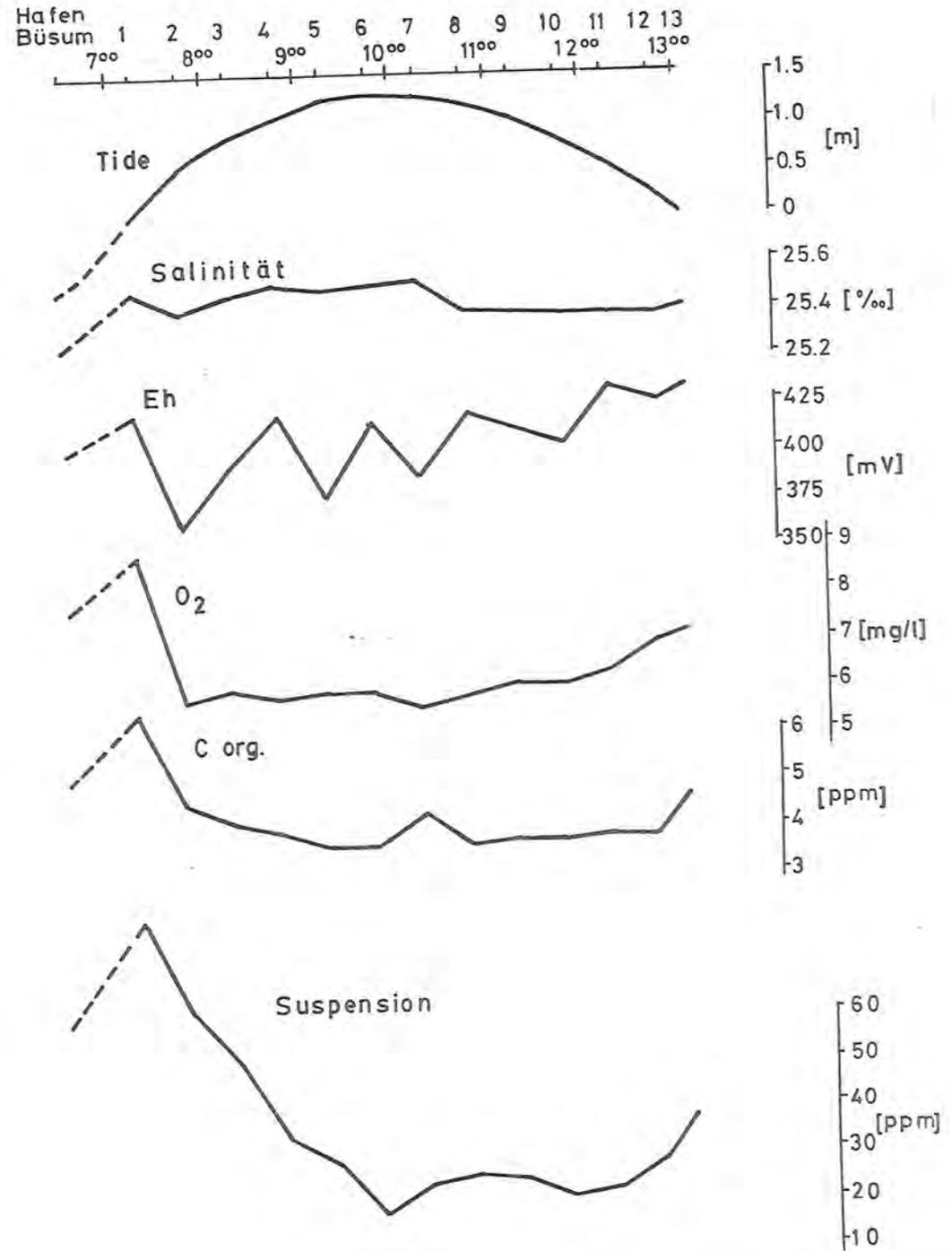
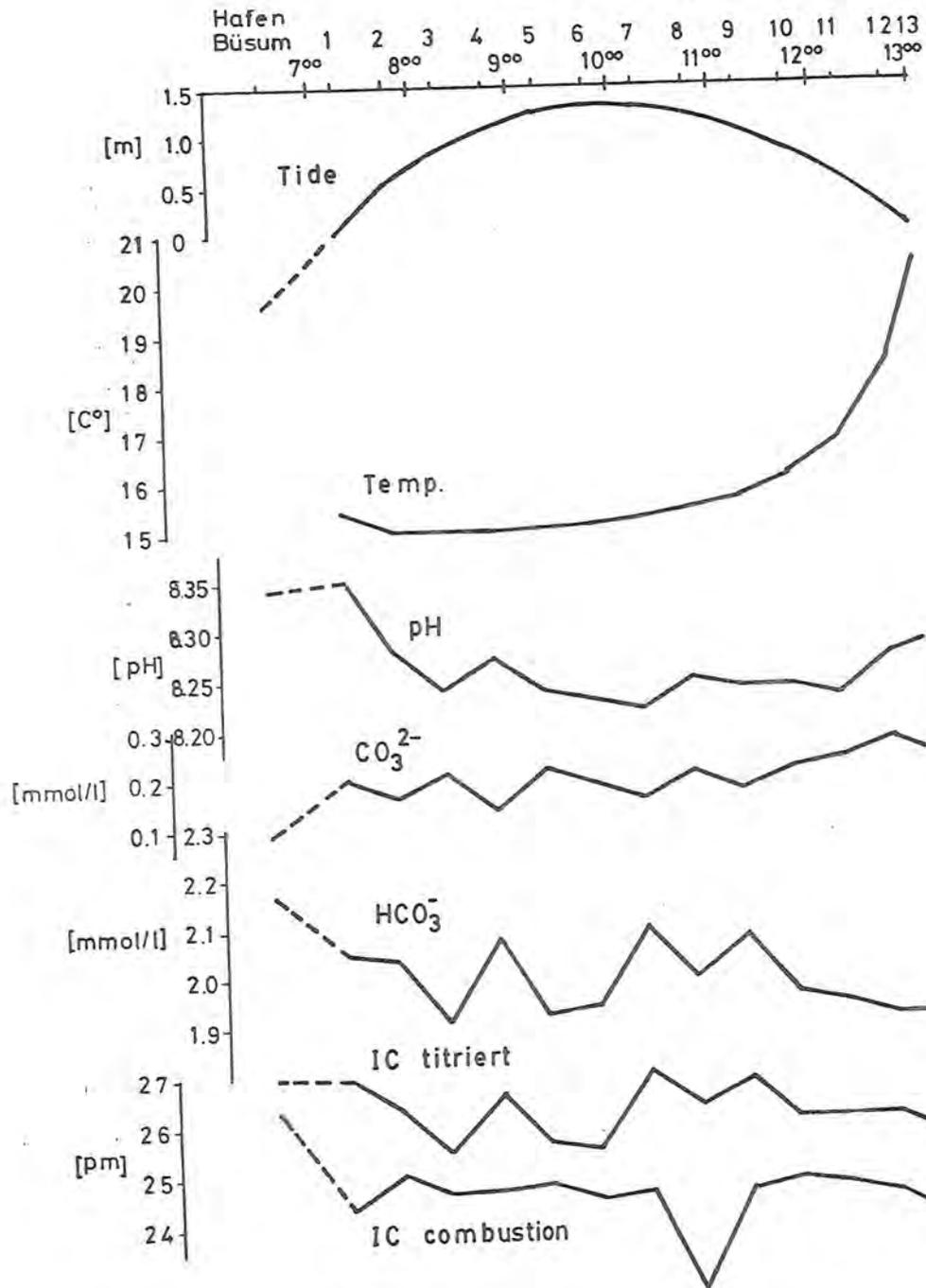
Büsum Meßplattform, 19. 10. '88





Büsum Meßplattform

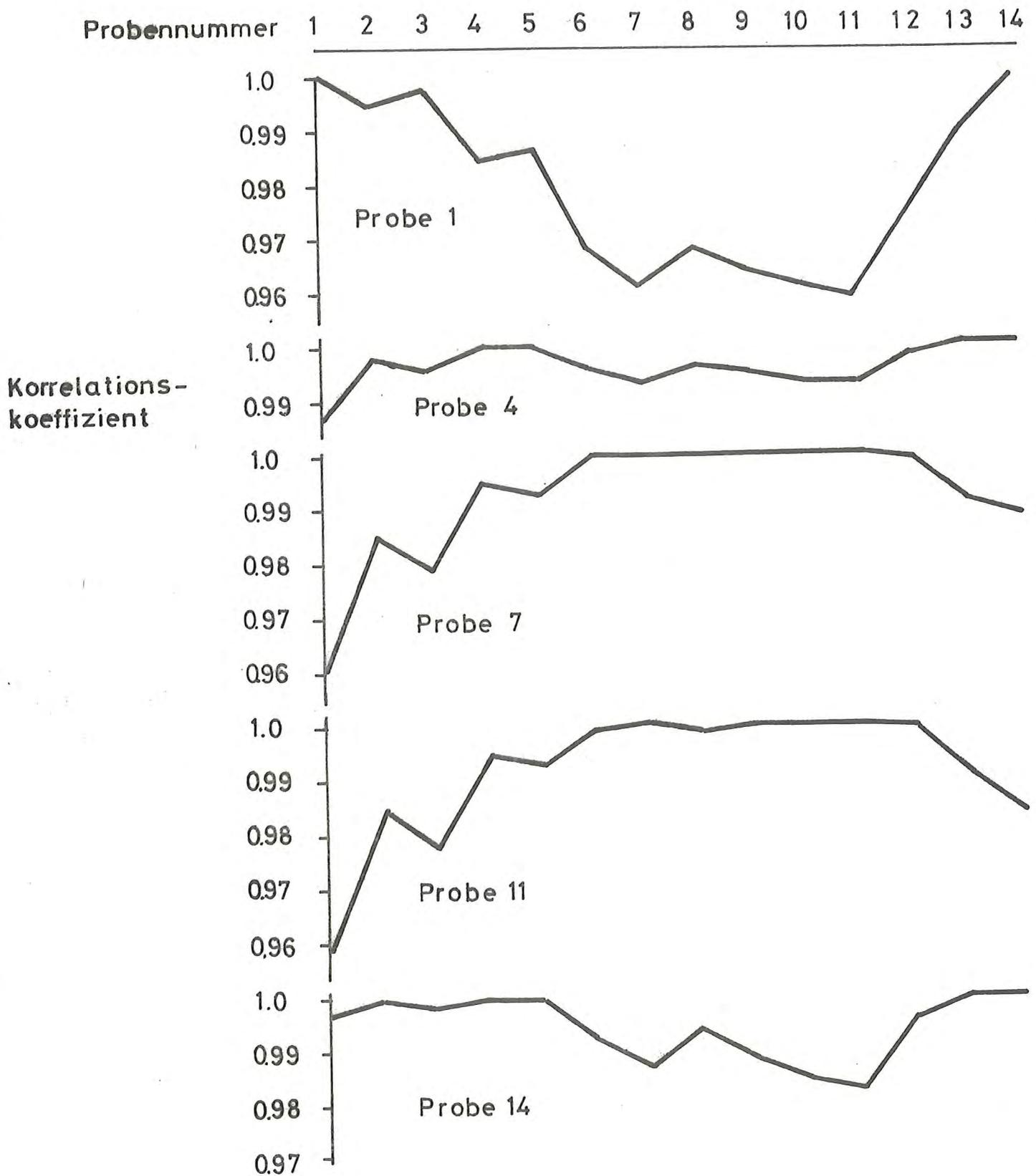
21.6.79



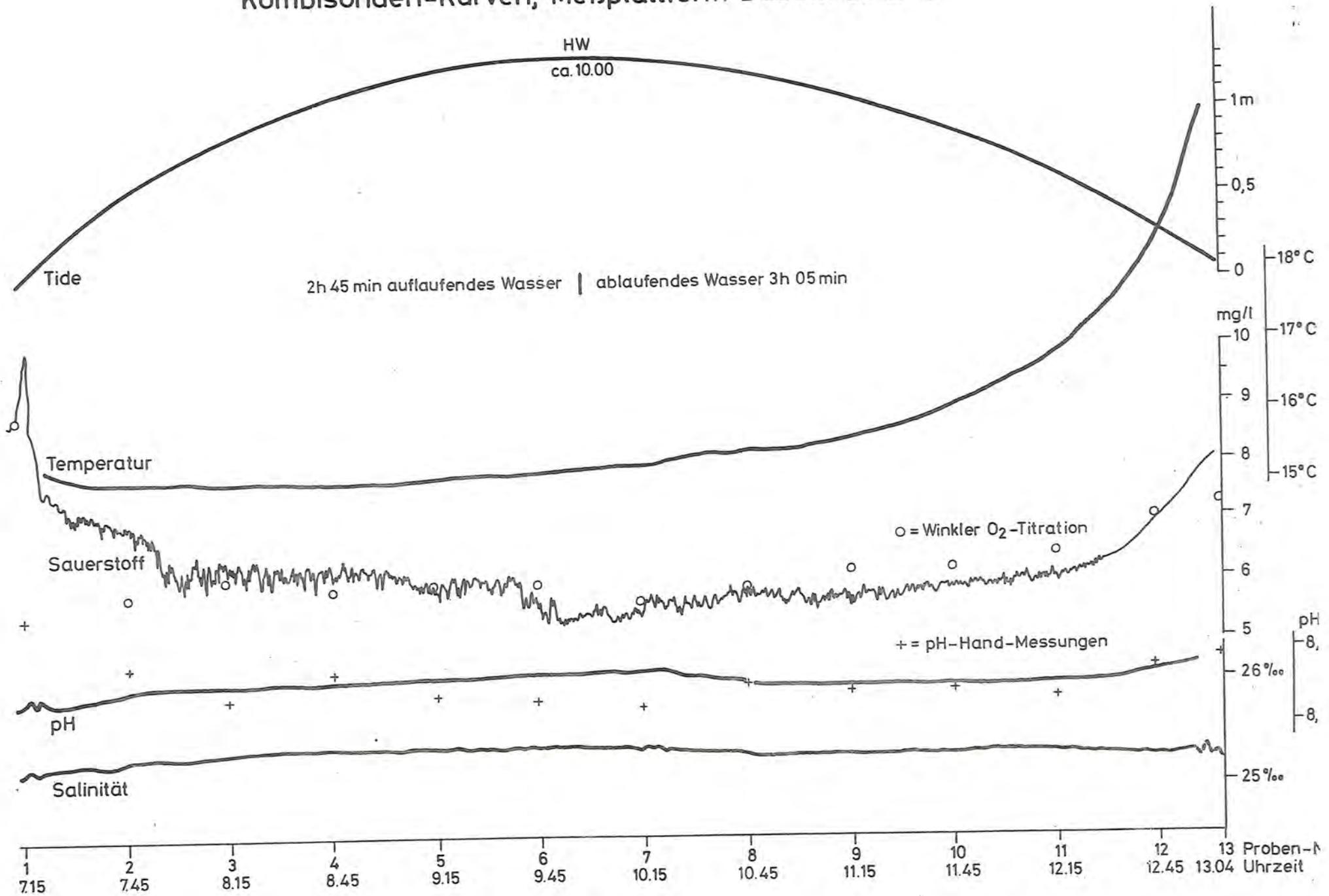
Büsum Meßplattform

21.9.78

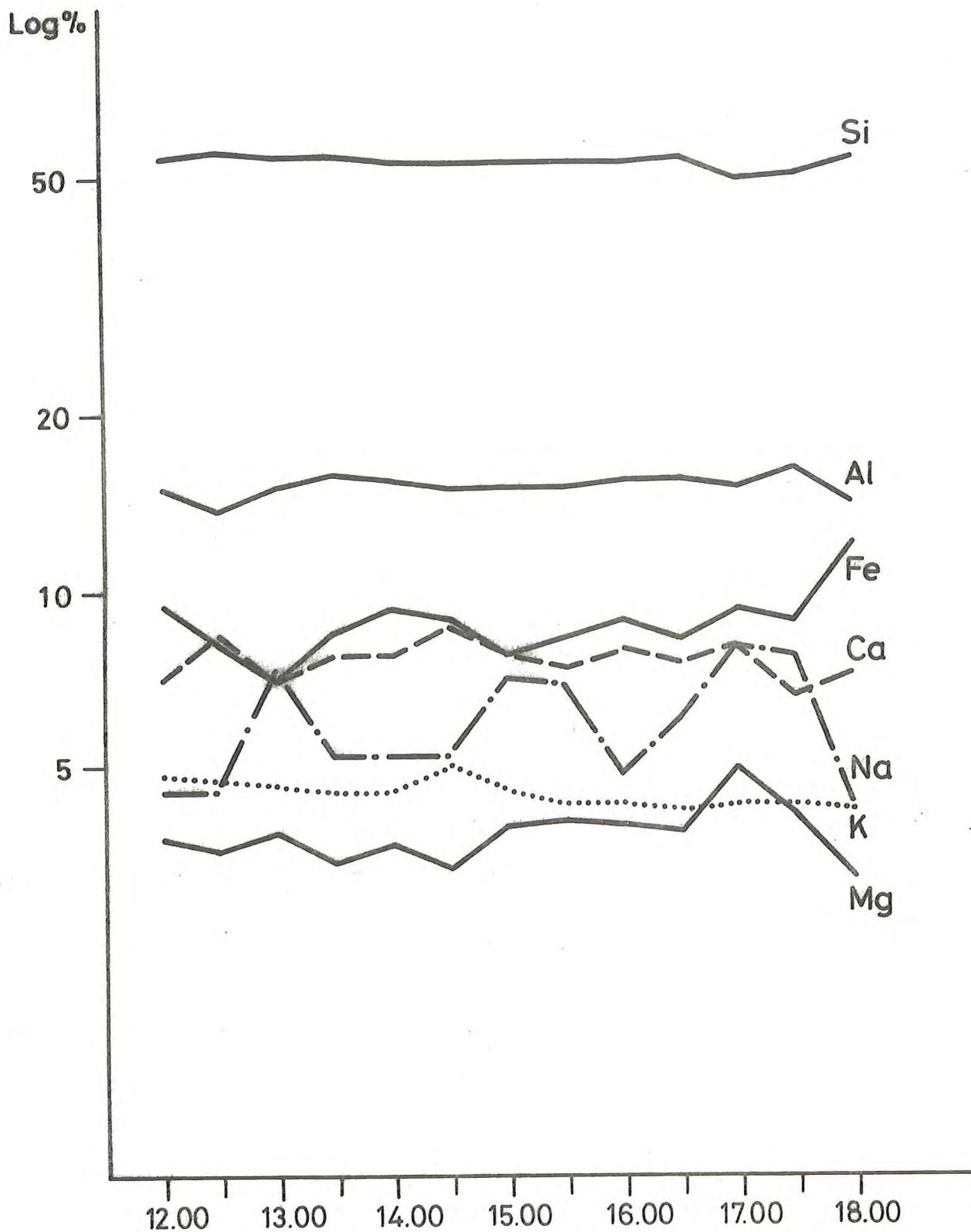
Korrelation der chemischen Zusammensetzung



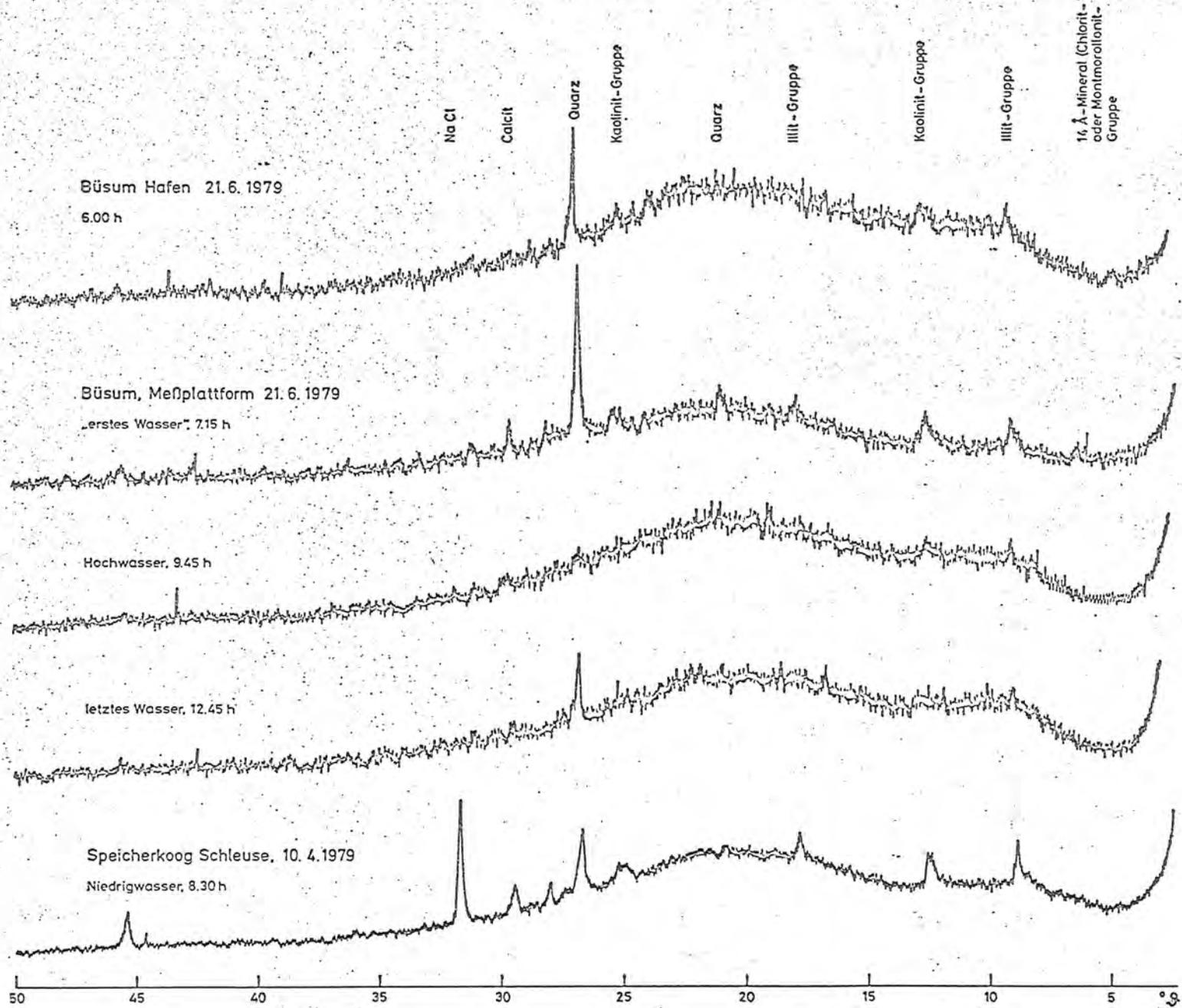
Kombisonden-Kurven, Meßplattform Büsum 21. 6. 79



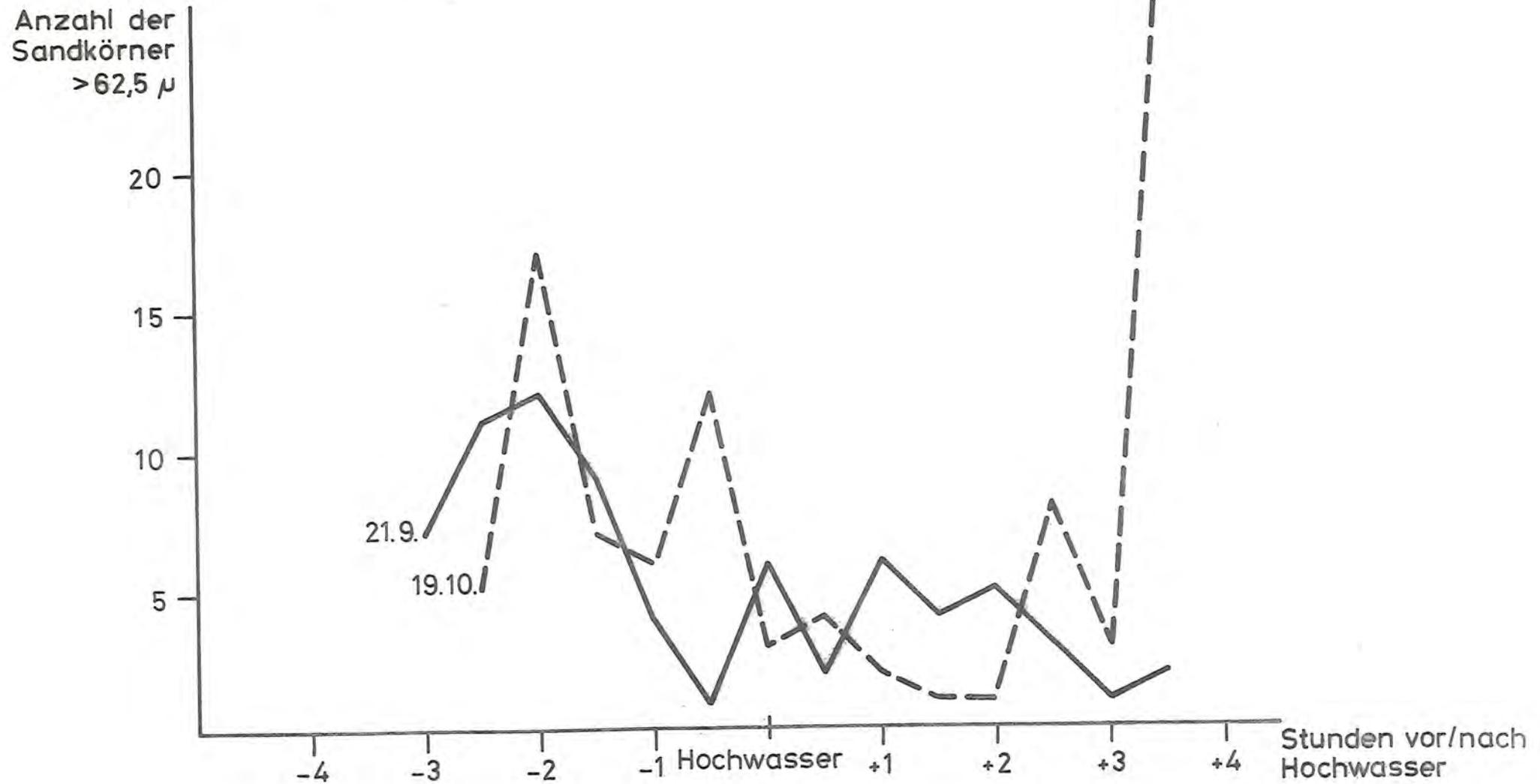
EDAX-Analysen Suspension
Büsum, 19. 10. 78



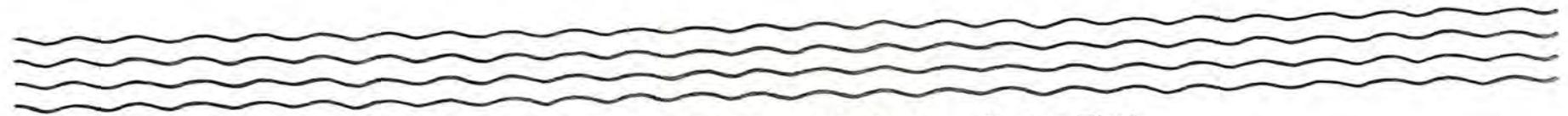
Röntgenbeugungsspektren von Suspensionen auf Filtern



Anzahl der Körner $>62,5 \mu\text{m}$ (very fine sand nach Wentworth, 1922)
geschätzt nach REM-Aufnahmen
bei Vergrößerung 100 x von $0,2 \mu$ -Filtern

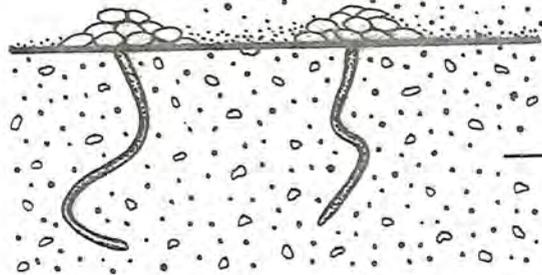


Kotpillenbildner differenzieren die Wattsedimente



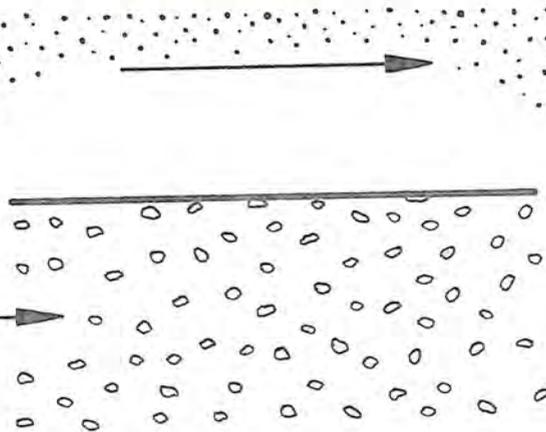
Abtransport der feinen Substanz mit der Flut
z.T. durch "Blasen-Lifting"

Diatomeen erzeugen
während der Ebbe
Sauerstoffbläschen

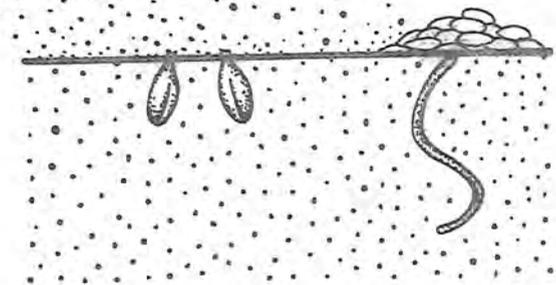


Mischwatt mit Besiedlung durch
Kotpillenbildner:

*Anreicherung der feinen Sub-
stanz in Kotpillen an der
Wattoberfläche*



Entstehung von Sandwatt



Schlickfestlegung in Landnähe
durch

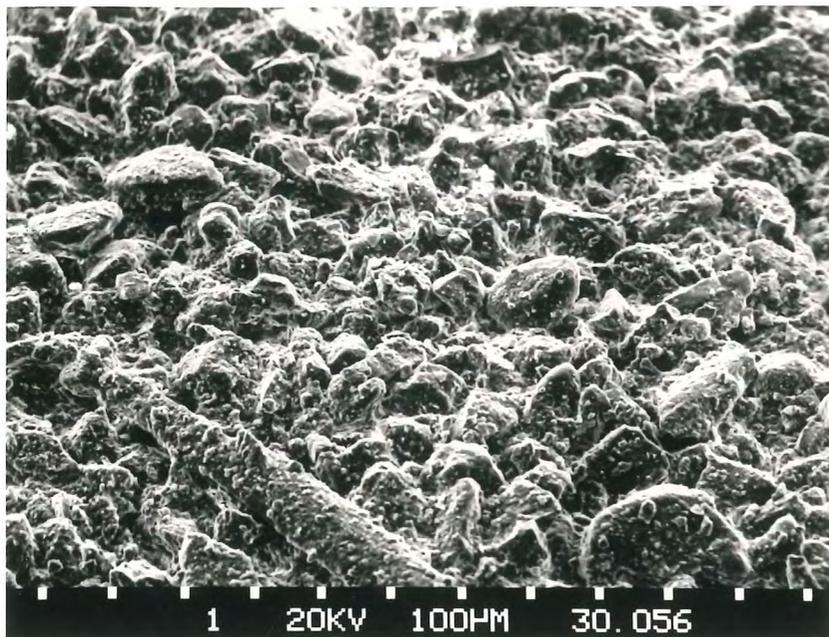
- Rückgang der Transport-
energie*
- Filterer (Cardium z. B.)*
- Anreicherung der org. Sub-
stanz, da schneller angelie-
fert als abgebaut, Bildung
von "Klebmasse"*

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen

Bedeutung der Systemzeile (z.B. Foto 1):

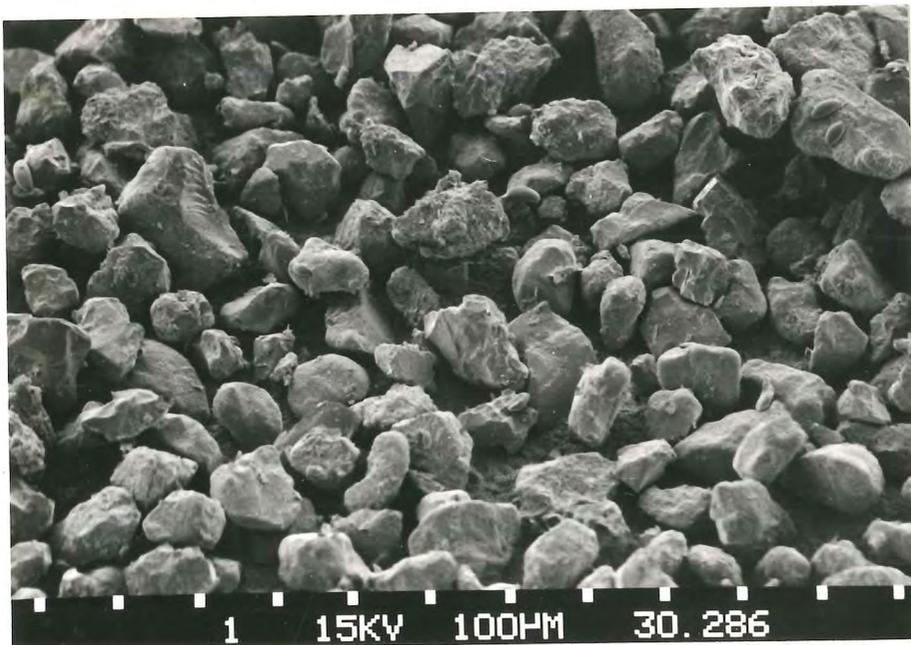
1 =	Kanalzahl
8.0 KV =	Beschleunigungsspannung
300 μm =	Abstand der Maßstabsmarken = 300 μ
30.2949 =	Foto Nr.

Foto 1



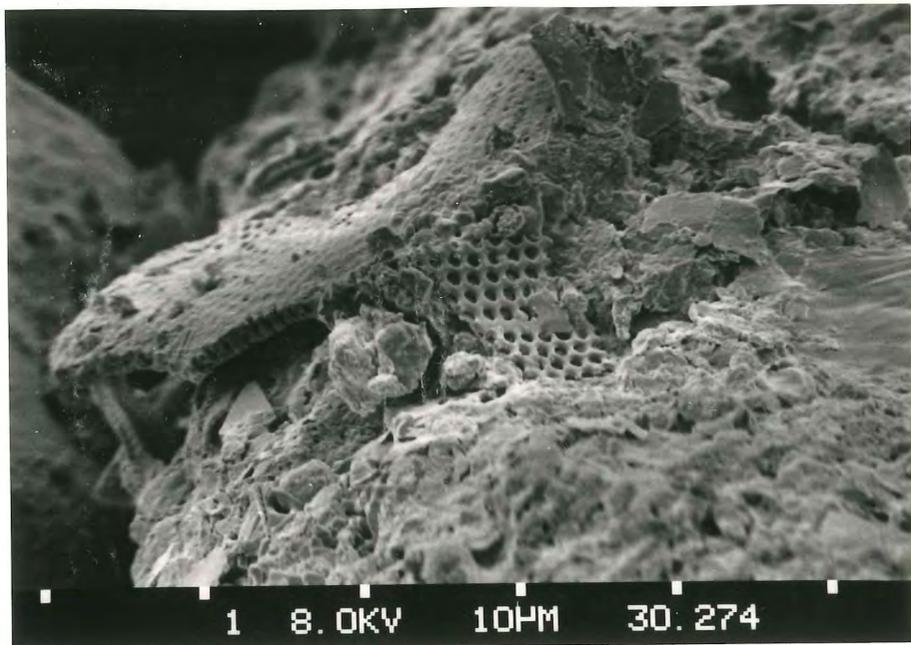
Schlickreiches Wattsediment,
Büsum Schnitt I, 100 m, 21.6.79
100-fach

Foto 2



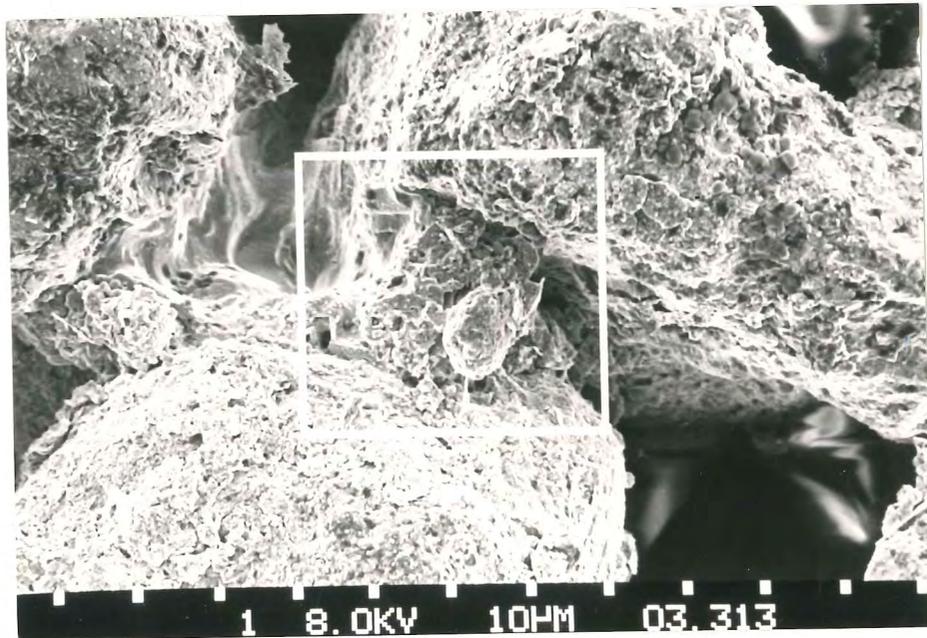
Schlickarmes Wattsediment,
Büsum, Schnitt I, 700 m, 21.6.79
100-fach
Beachte benthische Diatomeen z.B.
oben rechts

Foto 3



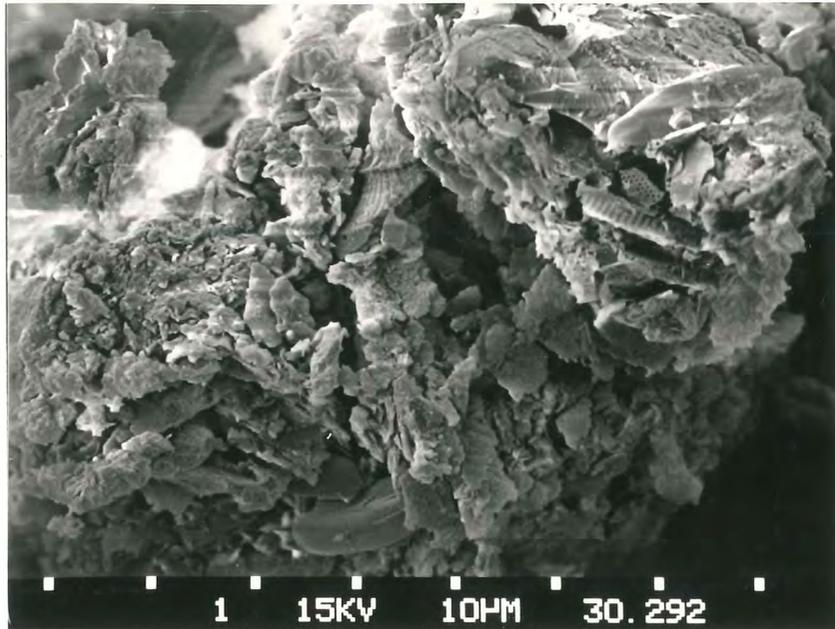
Partikel der Schluff- und Tonfraktion auf Sandkornoberfläche, Büsum, Schnitt I, 400 m, 21.6.79
2050-fach

Foto 4



Partikel der Schluff- und Tonfraktion in Kornwickeln des Sandes sitzend
Büsum, Schnitt II, 300 m, 16.12.77
1100-fach

Foto 5



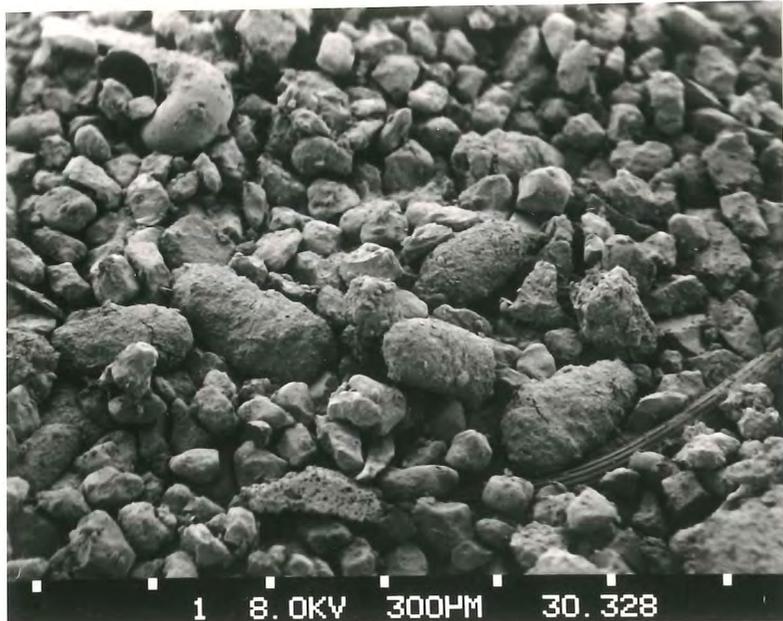
Agglomerat aus Partikeln der Schluff- und Tonfraktion. Es handelt sich um eine zerfallende Kotpille. Sichtbar sind Tonminerale und Diatomeenbruchstücke.
Büsum, Schnitt I, 900 m, 21.6.79
360-fach

Foto 6



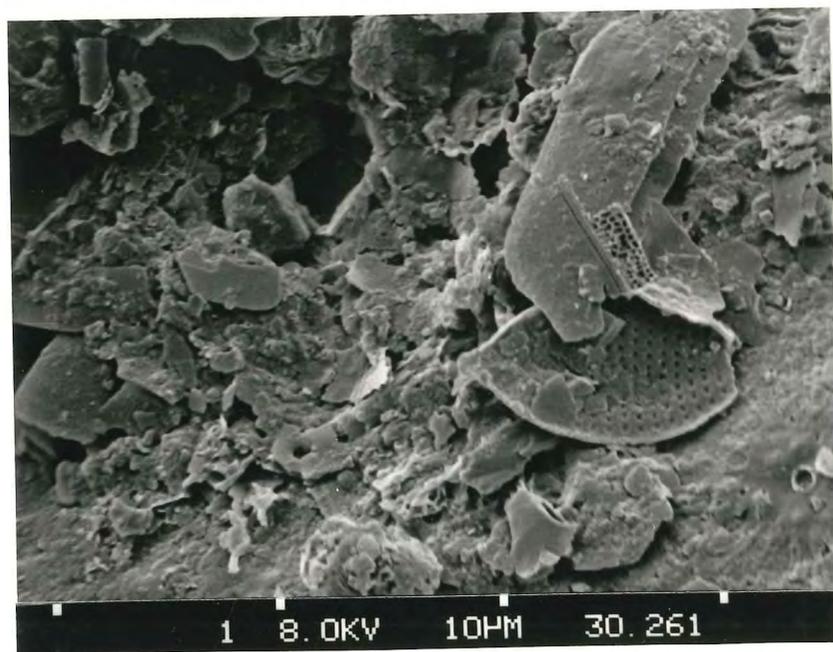
Kotpillen in Originallagerung eines Kotpillenhaufens. Beachte die kompakte Form und den Bewuchs mit benthischen Diatomeen.
Cuxhaven, Schnitt Arensch, 4.7.79
130-fach

Foto 7



Bestandteile der Wattsedimentfraktion
> 63 μ , Quarzsandkörner (Feinsand),
Faecal Pellets (200 x 100 μ), juveniler
Gastropode (oben links), Stachel von
Echinocardium cordatum (unten rechts).
Cuxhaven, Schnitt Arensch, 4.7.79
100-fach

Foto 8



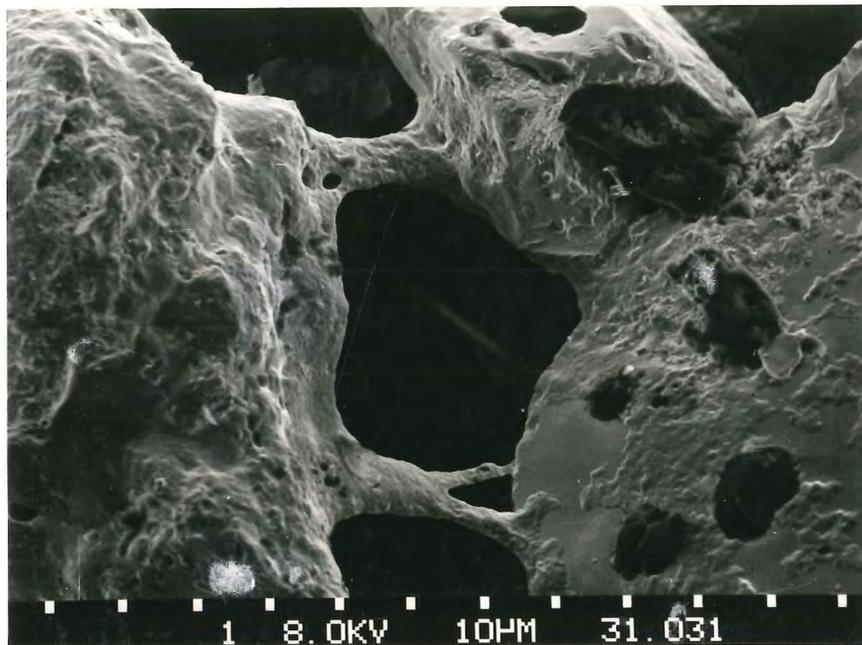
Bestandteile der Wattsedimentfraktion
63-2 μ . Tonmineralblättchen und Diato-
meenreste z.T. angelöst, auf einer Sand-
kornoberfläche.
Büsum, Schnitt I, 200 m, 21.6.79
3180-fach

Foto 9



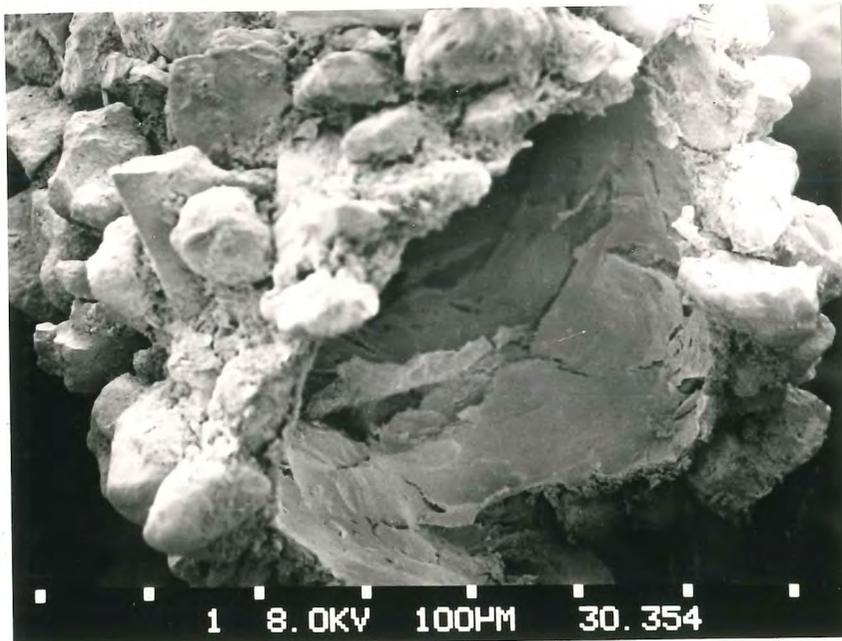
Bestandteile des Wattsediments
< 2 μ . Tonmineralblättchen und
Membranreste, sowie Salzkristalle
(unten links) und Eisenhydroxide (?)
(unten rechts).
Büsum, Schnitt I, 0 m, 21.6.79

Foto 10



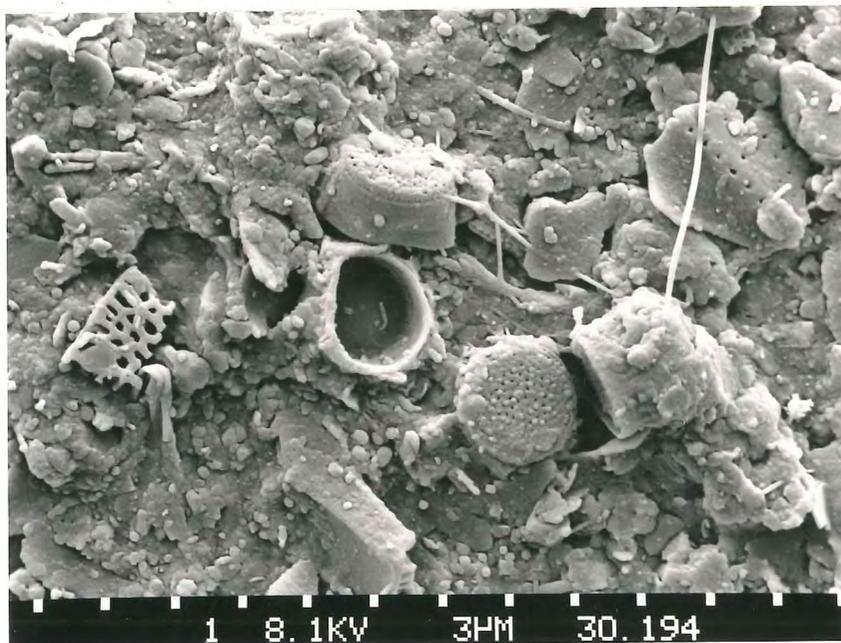
"Klebe"-Stränge zwischen Sandkörnern
aus amorpher organischer Substanz.
Büsum, 18.2.78
1000-fach

Foto 11



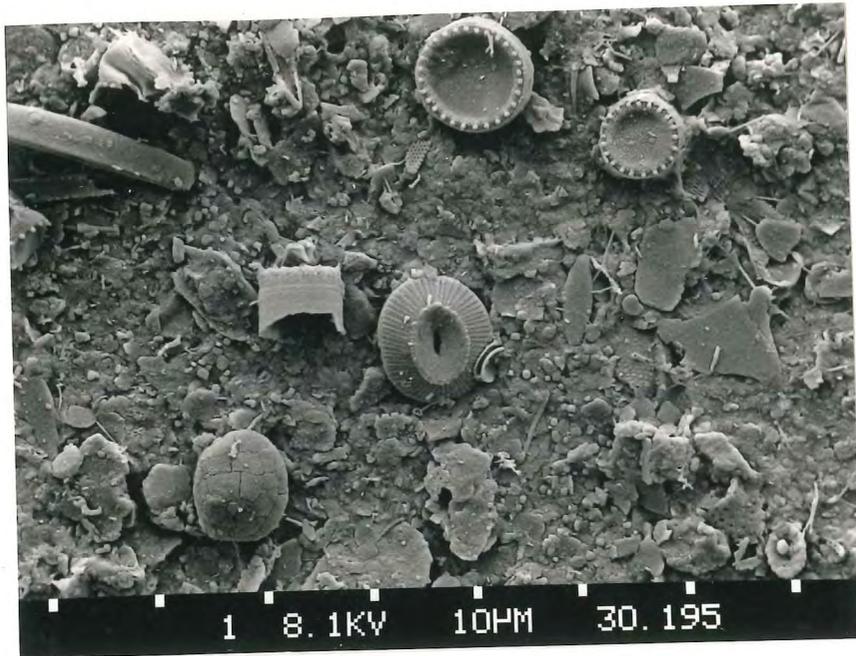
Aufbau einer Wurmröhre, außen Fein-
sand, in Zwickeln Schluff, innen
abPELLender organischer Belag aus
Fukose-reichen Glykoproteinen (Kör-
perschleimen), Erbauer vermutlich
Pygospio.
Cuxhaven, Profil Arensch, 4.7.79
150-fach

Foto 12



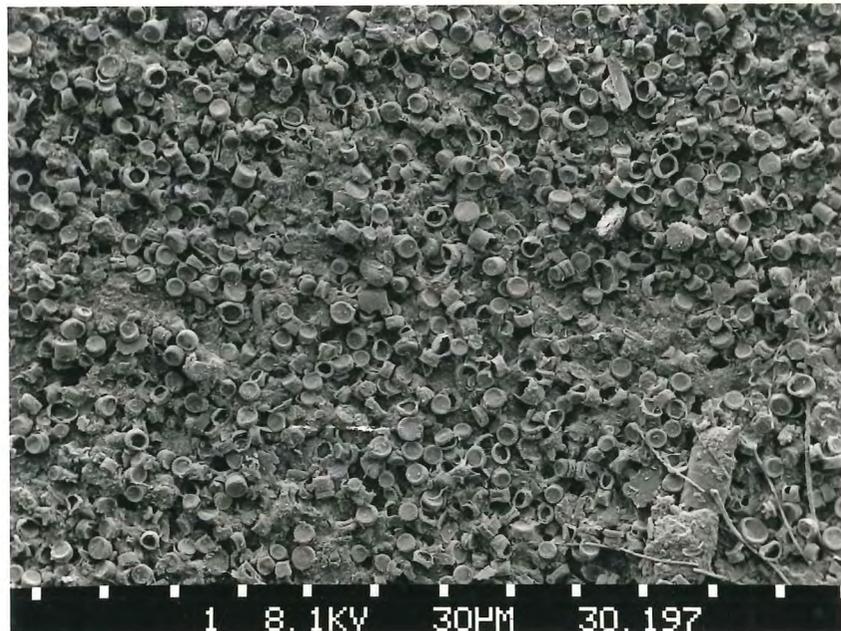
Suspension auf Filter.
Speicherkoog-Schleuse, 10.4.79, 12.30
3230-fach

Foto 13



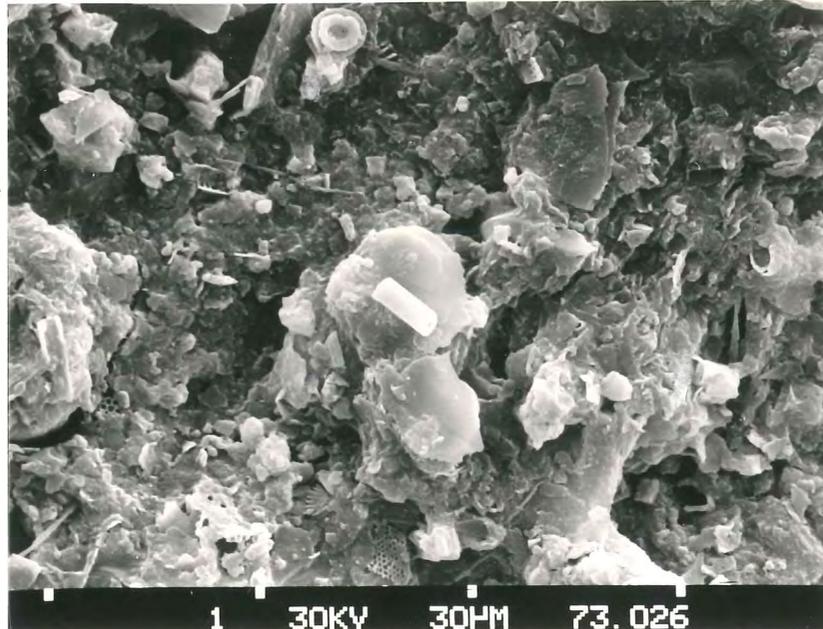
Suspension auf Filter.
Speicherkoog-Schleuse, 10.4.79, 17.00
Meerwasser hoher Salinität mit ver-
einzelten Diatomeen (Stephanodiscus,
oben rechts, u.a.) und Coccolithen.
1480-fach

Foto 14



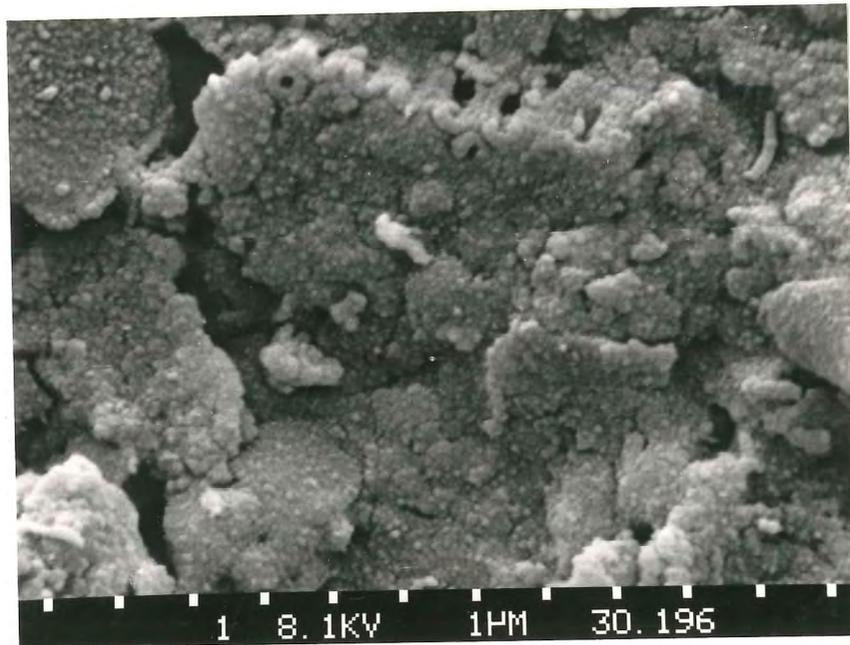
Suspension auf Filter.
Speicherkoog-Schleuse, 10.4.79, 17.30
Hafenwasser mit massiver Planktonblüte
der Diatomee Stephanodiscus.
320-fach

Foto 15



Suspension auf Filter.
Büsum, Meßplattform, 21.9.78, 15.30
Verhältnismäßig wenig "verklebtes"
Suspensionsmaterial der Silt- und
Tonfraktion.
1000-fach

Foto 16



Suspension auf Filter.
Speicherkoog-Schleuse, 10.4.79, 17.00
Stark "verklebtes" Suspensionsmaterial.
10 000-fach

Verzeichnis der Tabellen

- Tab. 1 EDAX-Analysen der Oberflächensedimente, Büsum, Schnitt I, 21.6.1979.
- Tab. 2 Korrelationsmatrize der Elemente untereinander zu Tab. 1.
- Tab. 3 EDAX-Analysen, Profil Arensch-Cuxhaven, 4.7.1979, Korrelationsmatrize der Elemente untereinander.
- Tab. 4 EDAX-Analysen, Wattsedimente, Mittelwerte verschiedener Serien und Profile.
- Tab. 5 Bestimmung des organischen Kohlenstoffs und des Gesamtstickstoffs, Wattsedimente, Profil II, Büsum, 16.12.1977.
- Tab. 6 Zucker im Wattsediment, nmol/g.
- Tab. 7 Zucker im Wattsediment, Prozentgehalte.
- Tab. 8 Daten der Probennahmen, Meßplattform Büsum und Dithmarscher Speicherkoog-Schleuse.
- Tab. 9 Mittelwerte und statistische Größen der chemischen Parameter aller Meßreihen aus dem Büsumer Watt.
- Tab. 10 Korrelation der chemischen Parameter untereinander, Büsum, Meßplattform, 21.9.1978.
- Tab. 11 Korrelation der chemischen Parameter untereinander, Büsum, Meßplattform, 19.10.1978.
- Tab. 12 Korrelation der chemischen Parameter untereinander, Büsum, Meßplattform, 21.6.1979.
- Tab. 13 Zucker im Wasser, nmol/l.
- Tab. 14 Zucker im Wasser, Prozentgehalte.
- Tab. 15 EDAX-Analysen, Mittelwerte der Suspensionsmeßreihen.
- Tab. 16 EDAX-Analysen, Suspensionsmeßreihen. Korrelationsmatrizen der Elemente untereinander.
- Tab. 17a Überströmungsmodell, Büsum, Profil II.
- Tab. 17 b Netto-Transport von Suspension, C_{org} -gelöst und gelöste Zucker nach Überströmungsmodell.

Tabelle 1

EDAX-Analysen Wattsedimente, Profil I, Büsum 21.6.1979
Datentabelle und Statistik

Parameter:	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	S	pH	Eh	
Profil- meter:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Deichfuß	1	1.741	7.479	71.484	1.723	6.869	0.386	9.742	0.576	7.320	-13.000
100	2	2.328	8.439	69.825	3.934	7.853	0.314	6.304	0.999	7.560	177.000
150	3	2.038	7.732	75.014	3.068	4.766	0.391	6.047	0.939	7.750	167.000
200	4	2.455	10.339	65.002	4.794	5.679	0.905	9.362	1.459	7.500	167.000
250	5	2.485	11.673	66.616	4.740	4.106	1.585	6.369	2.423	7.450	237.000
300	6	2.979	8.796	70.894	3.246	3.956	0.315	7.796	2.014	7.300	237.000
350	7	2.122	7.873	75.681	4.246	1.880	0.243	7.340	0.610	7.650	257.000
400	8	2.472	8.872	69.774	4.259	3.971	0.384	9.002	1.262	7.400	17.000
450	9	2.961	10.853	63.898	5.915	3.727	0.282	11.089	1.271	7.340	12.000
500	10	2.085	11.503	60.843	8.086	6.995	0.494	9.088	0.902	7.440	167.000
550	11	2.103	9.150	69.099	5.527	2.471	0.486	10.239	0.921	7.530	107.000
600	12	1.331	7.100	78.599	5.247	1.231	0.168	6.012	0.348	7.450	47.000
650	13	2.129	9.459	69.478	9.752	2.395	0.303	5.989	0.449	7.300	127.000
700	14	2.283	9.121	67.678	10.074	2.201	0.303	6.626	1.509	7.400	173.000
750	15	1.686	4.422	86.924	1.126	0.773	0.141	4.090	0.834	7.530	172.000
800	16	2.908	6.199	79.766	1.933	1.568	0.062	5.467	2.093	7.440	37.000
850	17	2.480	6.742	80.846	2.601	0.802	0.120	4.961	1.445	7.400	51.000
900	18	2.254	9.906	75.145	3.868	1.908	0.130	5.643	1.141	7.520	87.000
950	19	2.824	8.607	66.641	4.796	8.426	0.163	7.505	1.035	7.560	155.000
1000	20	2.917	7.552	67.874	3.069	9.815	0.290	5.444	3.035	7.380	157.000
1050	21	2.210	9.086	68.206	3.377	6.097	0.696	9.230	1.094	7.100	-30.000
N		21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000
M		2.323	8.614	71.395	4.542	4.166	0.389	7.312	1.255	7.444	119.429
s		0.441	1.760	6.334	2.371	2.683	0.338	1.945	0.670	0.138	85.109
s2		0.194	3.096	40.126	5.619	7.200	0.114	3.784	0.448	0.019	\$\$\$\$\$\$
v%		18.972	20.425	8.872	52.192	64.408	87.027	26.603	53.351	1.858	71.264

Tabelle 2

EDAX-Analysen Wattsedimente, Profil I, Büsum, 21.6.1979
 Korrelationsmatrize der Elemente miteinander

	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	S	pH	Eh
	Spalten-Korrelationsmatrix									
Mg	1.000	0.262	<u>-0.366</u>	-0.050	0.298	0.035	0.118	<u>0.729</u>	-0.180	0.108
Al	0.262	1.000	<u>-0.858</u>	0.599	0.284	<u>0.608</u>	<u>0.563</u>	0.109	-0.173	0.140
Si	<u>-0.366</u>	<u>-0.858</u>	1.000	<u>-0.569</u>	<u>-0.636</u>	<u>-0.485</u>	<u>-0.680</u>	-0.180	0.263	-0.090
K	-0.050	<u>0.599</u>	<u>-0.569</u>	1.000	-0.054	0.120	0.225	-0.205	-0.123	0.186
Ca	0.298	0.284	<u>-0.636</u>	-0.054	1.000	0.230	0.303	0.262	-0.094	0.074
Ti	0.035	<u>0.608</u>	<u>-0.485</u>	0.120	0.230	1.000	0.278	0.303	-0.118	0.247
Fe	0.118	<u>0.563</u>	<u>-0.680</u>	0.225	0.303	0.278	1.000	-0.187	-0.295	-0.307
S	<u>0.729</u>	0.109	-0.180	-0.205	0.262	0.303	-0.187	1.000	-0.182	0.218
pH	-0.180	-0.173	0.263	-0.123	-0.094	-0.118	-0.295	-0.182	1.000	<u>0.516</u>
Eh	0.108	0.140	-0.090	0.186	0.074	0.247	-0.307	0.218	<u>0.516</u>	1.000

unterstrichen: Korrelationen mit mehr als 90% Signifikanz

Tabelle 3

EDAX-Analysen Wattsedimente, Profil Arensch-Cuxhaven 4.7.1979
Korrelationsmatrize der Elemente miteinander

	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	S	pH	Eh
	Spalten-Korrelationsmatrix									
Mg	1.000	0.103	<u>-0.596</u>	0.013	<u>0.644</u>	0.145	0.068	<u>0.752</u>	0.034	0.298
Al	0.103	1.000	<u>-0.769</u>	<u>0.816</u>	<u>0.459</u>	-0.082	<u>0.747</u>	-0.212	-0.147	0.388
Si	<u>-0.596</u>	<u>-0.769</u>	1.000	<u>-0.665</u>	<u>-0.860</u>	-0.053	<u>-0.647</u>	-0.251	0.012	<u>-0.496</u>
K	0.013	<u>0.816</u>	<u>-0.665</u>	1.000	0.360	-0.001	<u>0.679</u>	-0.270	-0.094	0.316
Ca	<u>0.644</u>	<u>0.459</u>	<u>-0.860</u>	0.360	1.000	-0.023	0.242	0.334	0.204	<u>0.467</u>
Ti	0.145	-0.082	-0.053	-0.001	-0.023	1.000	0.001	-0.046	0.220	0.199
Fe	0.068	<u>0.747</u>	<u>-0.647</u>	<u>0.679</u>	0.242	0.001	1.000	-0.182	-0.283	0.346
S	<u>0.752</u>	-0.212	-0.251	-0.270	0.334	-0.046	-0.182	1.000	-0.128	-0.122
pH	0.034	-0.147	0.012	-0.094	0.204	0.220	-0.283	-0.128	1.000	-0.084
Eh	0.298	0.388	<u>-0.496</u>	0.316	<u>0.467</u>	0.199	0.346	-0.122	-0.084	1.000

unterstrichen: Korrelationen mit mehr als 90% Signifikanz

Tabelle 4

EDAX-Analysen, Wattsedimente

Mittelwerte verschiedener Serien und Profile

	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	S	pH	Eh	
Büsum 21.3.79	1.80	6.70	73.93	4.82	5.13	0.94	5.12	1.56	(7.71)*	-	Mittelwert
Profil 8 u.7 (7 Proben)	0.58	1.00	5.39	1.99	3.46	1.14	1.17	0.78	-	-	Standardabw.
Büsum 21.3.79	2.41	8.28	76.49	3.72	3.21	0.62	4.10	1.26	7.53	-	Mittelwert
Profil I (24 Proben)	0.67	1.84	6.74	1.53	3.01	1.15	1.81	0.69	0.20	-	Standardabw.
Büsum 21.6.79	2.32	8.61	71.40	4.54	4.17	0.39	7.31	1.26	7.44	119	Mittelwert
Profil I (21 Proben)	0.44	1.76	6.33	2.37	2.68	0.34	1.95	0.67	0.14	85	Standardabw.
Cuxhaven 4.7.79	1.57	7.84	68.25	3.72	6.86	0.70	9.71	1.38	7.66	216	Mittelwert
Profil Arensch (16 Proben)	0.64	1.88	7.42	0.89	3.93	0.59	1.97	1.08	0.10	55	Standardabw.

* 4 Werte

Tabelle 5

Bestimmung des organischen Kohlenstoffs und
des Gesamtstickstoffs, Wattsedimente
Profil II, Büsum 16.12.77

Profilmeter	C _{org} [‰]	N _{tot} [‰]	C/N
100	1.85	0.14	13.2
200	1.48	0.10	14.8
300	0.79		
400	0.59		
500	1.10		
600	0.55		
700	2.94	0.22	13.4
800	0.48		
900	0.90		
1000	0.51		

Tabelle 6

Gesamt (hydrolysiertbare) Zucker im Sediment (nmol/g)

	1	2	3	4	5	6	7	8	(10)
	Büsum: Schnitt II eis transportiertes Sediment 8.12.1978	Büsum: Schnitt I Schlick 21.6.1979 Deichfuß	100 m	Wattsand 0-3 cm	Wattsand an Redox- grenze	Büsum Wattsand 3-6 cm Tiefe	Wattsand 6-15 cm Tiefe	Cuxhaven Wurmgänge (Pygospio?)	Schlick Alster*
oxyribose		203	90						
lobiose		150	28						
tose		95	27						
mnose	102	313	97	23	21	14.4	12	217	1777
ose	18	60	6	10	8	9.8	8	117	122
nose	28	367	81	36	85	23.9	54	298	2620
ctose	-	167	40	44	32	27.8	-	183	-
binose	112	183	113	19	32	27.1	38	307	2683
ose	26	237	113	29	41	23.9	-	601	1011
actose	94	492	196	51	60	44.1	44	772	3340
ose	101	555	153	56	64	32.6	55	872	1867
cose	112	830	254	114	30	81.2	112	902	4320
me	595	3651	1198	382	373	296	323	4269	17740
g	106	663	211	68.76	67.14	53.3	58.14	768.4	3193
ucker µg/g	42.4	269	86	27.5	26.9	21.3	23.3	307.4	1277.2

Michaelis et al., 1976

Tabelle 7
Zucker im Sediment (%)

	1	2	3	4	5	6	7	8	(9)	(10)
	Büsum: Schnitt II eistransportiertes Sediment 8.12.1978	Büsum: Schnitt I Schlick 21.6.1979 Deichfuß	100 m	Wattsand 0-3 cm	Wattsand an Redox- grenze	Büsum Wattsand 3-6 cm Tiefe	Wattsand 6-15 cm Tiefe	Cuxhaven Wurmgänge (Pygospio?)	Ozean. Plankton Mittel**	Schlick Alster*
Desoxyribose		5.6	7.5							
Cellobiose		4.1	2.4							
Maltose		2.6	2.2							
Rhamnose	17.2	8.6	8.1	6.0	5.6	6.8	3.7	5.1	5.0	11.5
Ribose	3.0	1.6	0.5	2.6	9.1	3.4	2.5	2.7	13.9	0.9
Mannose	4.7	10.0	6.8	9.4	22.8	8.1	16.7	7.0	14.8	15.5
Fructose	-	4.6	3.4	11.5	8.6	9.5	-	4.3	-	-
Arabinose	18.9	3.0	9.4	5.0	8.6	9.1	11.8	7.2	2.6	19.0
Sucrose	4.4	6.5	9.4	7.6	11.0	8.1	-	14.1	6.0	6.3
Galactose	15.9	13.5	16.4	13.4	16.1	16.5	13.6	18.1	27.7	19.7
Xylose	17.0	15.2	12.8	14.7	17.2	11.1	17.0	20.4	7.5	13.2
Glucose	18.9	22.7	21.2	29.8	8.0	27.4	34.7	21.1	21.7	25.5

* Michaelis et al., 1976

** Degens and Mopper, 1975

Tabelle 8
Probennahmedaten

atum	Ort	Zeit	Dauer(h)	Flut	Auflaufhöhe	Temp.	Wind	Wolken	Bemerkung
1.9.1979	Büsum/Meßplattform	12.30-19.00	6.30	15.30	2.10 Überfl.höhe	≈ 16	NW3-4	1	
9.10.1978	Büsum/Meßplattform	11.42-17.35	5.53	14.30	1.60 Überfl.höhe	≈ 12	NW2-3	1/2	
0.4.1979	Schleuse Speicherkg.	8.05-19.30	11.35	11.45	+1.18 NN	≈ 5-10	NW4	1/4	Plankton- blüte im Hafenwasser (Stephano- discus)
1.6.1979	Büsum/Meßplattform	7.15-13.06	5.51	9.45	1.30 Überfl.höhe	≈ 15-20	0-1	0	klares Was- ser, Massen auftreten v. Nocte- luca milia- ris (ex gr.)

Tabelle 9

Mittelwerte und andere statistische Größen aller chemischen Parameter und aller MeBreihen aus dem Büsumer Watt

	Tide (m)	Temp. °C	Salin. ‰	pH	Eh	O ₂ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mmol/l)	CO ₃ ⁼	anorg.C (titr.) ppm	anorg.C (wet combust.) ppm	Cl gelöst ppm	PO ₄ ppm	NO ₃ (mymol/l)	org.C ppm	freie Aminos. (mymol/l)	Zucker (pes.) (mymol/l)	Sus- pen- sion ppm	Ca in Suspension (mg/l)	Hg in Suspension (mg/l)
N	14.000	7.000	14.000	14.000		14.000													
M	1.376	15.471	28.667	8.047		9.014													
s	0.661	0.538	0.154	0.050		1.369			24	12.000	13.000	13.000	13.000	12.000					
s2	0.436	0.287	0.024	0.002		1.874				22.350	411.909	0.391	21.308	6.583					
vZ	47.303	3.475	0.538	0.615		15.186				1.622	8.450	0.133	0.855	2.742					
										2.632	71.397	0.018	0.731	7.520					
										7.259	2.051	33.957	4.012	41.654					
N	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	13.000	14.000	14.000	14.000		14.000	7.000	14.000						
M	0.986	12.029	25.043	8.029	474.857	8.803	2.188	0.085	27.269	25.6	348.614	0.497	70.000						
s	0.567	0.194	0.239	0.211	9.710	0.701	0.106	0.021	1.271		4.178	0.026	3.397						
s2	0.322	0.038	0.057	0.044	94.286	0.492	0.011	0.000	1.617		17.454	0.001	11.538						
vZ	57.511	1.612	0.956	2.625	2.045	7.965	4.854	25.078	4.663		1.198	5.286	4.853						
N		24.000	24.000	24.000	24.000	19.000	24.000	4.000	24.000	24.000		24.000		24.000	24.000		24.000		
M		4.340	18.911	8.172	420.167	11.053	2.594	0.106	31.334	29.733		0.286		4.021	6.845		38.208		
s		0.134	2.960	0.183	14.493	0.388	0.209	0.016	2.729	2.915		0.298		0.994	3.409		8.262		
s2		0.018	8.882	0.033	210.058	0.151	0.044	0.000	7.449	8.496		0.089		0.988	11.622		60.259		
vZ		3.080	15.760	2.237	3.449	3.513	8.060	15.507	8.710	9.803		104.228		23.547	49.804		21.623		
N	13.000	13.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000	14.000				14.000			14.000		
M	0.785	15.996	25.435	8.263	407.643	6.381	1.996	0.193	26.330	24.586				4.186			35.429		
s	0.469	1.598	0.077	0.040	21.507	0.928	0.081	0.046	0.496	0.755				0.771			17.199		
s2	0.220	2.554	0.006	0.002	462.555	0.861	0.007	0.002	0.246	0.571				0.595			295.80		
vZ	59.774	9.992	0.301	0.480	5.276	14.537	4.082	24.065	1.884	3.072				18.431			48.545		

N= Anzahl der Messungen
M= Mittelwert
s= Standardabweichung
s2= Varianz
vZ= Standardabweichung in % vom Mittel

Tabelle 10

Korrelation der chemischen Parameter untereinander, 21.9.78, Büsum, Meßplattform

	Tide	Temp.	Sal.	pH	anorg.C	org.C	Ca gel.	PO ₄	NO ₃	Zu.	Susp.	Ca	Mg	O ₂
Tide	1.000	0.148	0.090	<u>0.781</u>	0.258	-0.302	<u>0.700</u>	0.302	<u>-0.679</u>	<u>-0.520</u>	<u>-0.606</u>	<u>-0.612</u>	<u>-0.664</u>	-0.101
Temp.	0.148	1.000	-0.364	0.374	-0.028	0.206	0.017	0.151	0.434	0.329	-0.321	-0.206	<u>-0.581</u>	0.341
Sal.	0.090	-0.364	1.000	-0.015	0.244	-0.367	<u>0.584</u>	0.353	-0.510	-0.479	0.063	-0.032	0.215	0.061
pH	0.781	0.374	-0.015	1.000	0.233	-0.350	<u>0.731</u>	0.266	<u>-0.562</u>	-0.368	<u>-0.661</u>	<u>-0.640</u>	<u>-0.626</u>	-0.251
anorg.C	0.258	-0.028	0.244	0.233	1.000	<u>0.413</u>	0.135	0.426	0.095	0.074	0.229	0.129	0.163	0.086
org.C	-0.302	0.206	-0.367	-0.350	0.413	1.000	<u>-0.547</u>	-0.037	<u>0.701</u>	<u>0.749</u>	<u>0.612</u>	<u>0.612</u>	0.338	<u>0.602</u>
Ca gel.	<u>0.700</u>	0.017	<u>0.584</u>	<u>0.731</u>	0.135	<u>-0.547</u>	1.000	0.165	<u>-0.733</u>	<u>-0.598</u>	<u>-0.473</u>	<u>-0.507</u>	-0.388	-0.208
PO ₄	0.302	0.151	0.353	0.266	0.426	-0.037	0.165	1.000	-0.032	0.137	0.208	0.197	0.217	0.254
NO ₃	<u>-0.679</u>	0.434	<u>-0.510</u>	<u>-0.562</u>	0.095	0.701	<u>-0.733</u>	-0.032	1.000	<u>0.851</u>	<u>0.645</u>	<u>0.678</u>	<u>0.478</u>	<u>0.548</u>
Zucker	-0.520	0.329	<u>-0.479</u>	-0.368	0.074	<u>0.749</u>	<u>-0.598</u>	0.137	0.851	1.000	<u>0.730</u>	<u>0.762</u>	<u>0.598</u>	<u>0.620</u>
Suspension	<u>0.606</u>	-0.321	0.063	<u>-0.661</u>	0.229	<u>0.612</u>	<u>-0.473</u>	0.208	<u>0.645</u>	<u>0.730</u>	1.000	<u>0.981</u>	<u>0.902</u>	<u>0.641</u>
Ca	<u>-0.612</u>	-0.206	-0.032	<u>-0.640</u>	0.129	0.612	-0.507	0.197	<u>0.678</u>	<u>0.762</u>	0.981	1.000	<u>0.846</u>	0.709
Mg	<u>-0.664</u>	<u>-0.581</u>	0.215	<u>-0.626</u>	0.163	0.338	-0.388	0.217	<u>0.478</u>	<u>0.598</u>	0.902	<u>0.846</u>	1.000	0.375
O ₂	-0.101	0.341	0.061	-0.251	0.086	<u>0.602</u>	-0.208	0.254	<u>0.548</u>	<u>0.620</u>	<u>0.641</u>	<u>0.709</u>	0.375	1.000

Unterstrichen: Signifikanz = 90 %

Tabelle 11

Korrelation der chemischen Parameter untereinander, Büsum, Meßplattform, 21.9.1978
 Analysen vom 19.10.78

	Tide	Temp	Sal	pH	Eh	O ₂	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻⁻	ino.C	Ca gel.	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	Zucker	Susp.	Ca	Mg
Spalten-Korrelationsmatrix																
e	1.000	<u>-0.719</u>	<u>-0.648</u>	<u>-0.493</u>	<u>-0.709</u>	<u>-0.678</u>	0.313	0.333	0.380	<u>-0.527</u>	<u>-0.263</u>	<u>0.585</u>	<u>-0.647</u>	<u>-0.565</u>	<u>-0.430</u>	<u>0.610</u>
p	<u>-0.719</u>	1.000	<u>0.806</u>	<u>0.709</u>	<u>0.509</u>	<u>0.793</u>	<u>-0.450</u>	<u>-0.403</u>	<u>-0.532</u>	0.155	<u>0.836</u>	<u>-0.467</u>	<u>0.728</u>	<u>0.582</u>	0.434	<u>-0.656</u>
	<u>-0.648</u>	<u>0.806</u>	1.000	<u>0.965</u>	<u>0.582</u>	<u>0.962</u>	<u>-0.697</u>	<u>-0.266</u>	<u>-0.752</u>	0.161	<u>0.780</u>	<u>-0.537</u>	<u>0.737</u>	<u>0.870</u>	<u>0.742</u>	<u>-0.760</u>
	<u>-0.493</u>	<u>0.709</u>	<u>0.965</u>	1.000	<u>0.546</u>	<u>0.948</u>	<u>-0.743</u>	<u>-0.098</u>	<u>-0.764</u>	<u>-0.025</u>	<u>0.572</u>	<u>-0.430</u>	<u>0.654</u>	<u>0.885</u>	<u>0.813</u>	<u>-0.705</u>
	<u>-0.709</u>	<u>0.509</u>	<u>0.582</u>	<u>0.546</u>	1.000	<u>0.545</u>	<u>-0.302</u>	<u>-0.239</u>	<u>-0.351</u>	0.273	0.022	<u>-0.513</u>	<u>0.693</u>	0.443	0.419	<u>-0.330</u>
	<u>-0.678</u>	<u>0.793</u>	<u>0.962</u>	<u>0.948</u>	<u>0.545</u>	1.000	<u>-0.707</u>	<u>-0.133</u>	<u>-0.739</u>	0.130	0.297	<u>-0.487</u>	<u>0.738</u>	<u>0.904</u>	0.784	<u>-0.822</u>
3	0.313	<u>-0.450</u>	<u>-0.697</u>	<u>-0.743</u>	<u>-0.302</u>	<u>-0.707</u>	1.000	<u>-0.111</u>	<u>0.980</u>	<u>-0.019</u>	0.130	0.225	<u>-0.382</u>	<u>-0.700</u>	<u>-0.625</u>	0.396
3	0.333	<u>-0.403</u>	<u>-0.266</u>	<u>-0.098</u>	<u>-0.239</u>	<u>-0.133</u>	<u>-0.111</u>	1.000	0.089	<u>-0.429</u>	<u>-0.842</u>	0.219	<u>-0.465</u>	0.002	0.094	0.125
3	0.380	<u>-0.532</u>	<u>-0.752</u>	<u>-0.764</u>	<u>-0.351</u>	<u>-0.739</u>	<u>0.980</u>	0.089	1.000	<u>-0.106</u>	<u>-0.159</u>	0.270	<u>-0.470</u>	<u>-0.701</u>	<u>-0.607</u>	0.422
g	<u>-0.527</u>	0.155	0.161	<u>-0.025</u>	0.273	0.130	<u>-0.019</u>	<u>-0.429</u>	<u>-0.106</u>	1.000	<u>0.535</u>	<u>-0.450</u>	0.234	0.126	<u>-0.005</u>	<u>-0.207</u>
3	<u>-0.263</u>	<u>0.836</u>	<u>0.780</u>	<u>0.572</u>	0.022	0.297	0.130	<u>-0.842</u>	<u>-0.159</u>	<u>0.535</u>	1.000	<u>-0.332</u>	<u>0.760</u>	<u>-0.520</u>	<u>-0.831</u>	<u>-0.612</u>
3	<u>0.585</u>	<u>-0.467</u>	<u>-0.537</u>	<u>-0.430</u>	<u>-0.513</u>	<u>-0.487</u>	0.225	0.219	0.270	<u>-0.450</u>	<u>-0.332</u>	1.000	<u>-0.579</u>	<u>-0.413</u>	<u>-0.272</u>	<u>0.502</u>
3	<u>-0.647</u>	<u>0.728</u>	<u>0.737</u>	<u>0.654</u>	<u>0.693</u>	<u>0.738</u>	<u>-0.382</u>	<u>-0.465</u>	<u>-0.470</u>	0.234	<u>0.760</u>	<u>-0.579</u>	1.000	0.402	0.227	<u>-0.729</u>
3	<u>-0.565</u>	<u>0.582</u>	<u>0.870</u>	<u>0.885</u>	0.443	<u>0.904</u>	<u>-0.700</u>	0.002	<u>-0.701</u>	0.126	<u>-0.520</u>	<u>-0.413</u>	0.402	1.000	<u>0.949</u>	<u>-0.601</u>
3	<u>-0.430</u>	0.434	<u>0.742</u>	<u>0.813</u>	0.419	<u>0.784</u>	<u>-0.625</u>	0.094	<u>-0.607</u>	<u>-0.005</u>	<u>-0.831</u>	<u>-0.272</u>	0.227	<u>0.949</u>	1.000	<u>-0.453</u>
	<u>0.610</u>	<u>-0.656</u>	<u>-0.760</u>	<u>-0.705</u>	<u>-0.330</u>	<u>-0.822</u>	0.396	0.125	0.422	<u>-0.207</u>	<u>-0.612</u>	<u>0.502</u>	<u>-0.729</u>	<u>-0.601</u>	<u>-0.453</u>	1.000

Unterstrichen: Signifikanz größer als 90 %

Tabelle 12

Korrelation der chemischen Parameter untereinander, 21.6.79, Büsum, Meßplattform

	Tide	Temp.	Sal.	pH	Eh	O ₂	HCO ₃	CO ₃	anorg.C	anorg.C	org.C	Susp.
Tide	Spalten-Korrelationsmatrix											
	1.000	<u>-0.650</u>	0.417	<u>-0.752</u>	-0.336	<u>-0.803</u>	0.220	<u>-0.493</u>	0.134	-0.084	<u>-0.665</u>	<u>-0.653</u>
Temp.	<u>-0.650</u>	1.000	<u>-0.493</u>	0.168	<u>0.567</u>	0.391	<u>-0.467</u>	<u>0.692</u>	-0.285	-0.098	0.054	-0.062
Salinität	0.417	<u>-0.493</u>	1.000	-0.394	-0.108	-0.316	-0.223	0.189	-0.067	-0.378	-0.068	-0.174
pH	<u>-0.752</u>	0.168	-0.394	1.000	0.078	<u>0.857</u>	0.447	-0.345	0.362	0.312	<u>0.843</u>	<u>0.911</u>
Eh	-0.336	<u>0.567</u>	-0.108	0.078	1.000	0.378	-0.215	0.374	0.062	-0.349	-0.010	-0.143
O ₂	<u>-0.803</u>	0.391	-0.316	<u>0.857</u>	0.378	1.000	0.183	-0.002	0.270	0.196	<u>0.828</u>	<u>0.771</u>
HCO ₃	0.220	<u>-0.467</u>	-0.223	0.447	-0.215	0.183	1.000	<u>-0.895</u>	<u>0.849</u>	0.396	0.410	0.397
CO ₃	<u>-0.493</u>	<u>0.692</u>	0.189	-0.345	0.374	-0.002	<u>-0.895</u>	1.000	<u>-0.654</u>	<u>-0.550</u>	-0.253	-0.311
anorg.C	0.134	-0.285	-0.067	0.362	0.062	0.270	<u>0.849</u>	<u>-0.654</u>	1.000	0.146	0.402	0.272
anorg.C	-0.084	-0.098	-0.378	0.312	-0.349	0.196	0.396	<u>-0.550</u>	0.146	1.000	0.220	0.272
org.C	<u>-0.665</u>	0.054	-0.068	<u>0.843</u>	-0.010	<u>0.828</u>	0.410	-0.253	0.402	0.220	1.000	<u>0.931</u>
Suspension	<u>-0.653</u>	-0.062	-0.174	<u>0.911</u>	-0.143	<u>0.771</u>	0.397	-0.311	0.272	0.272	<u>0.931</u>	1.000

Unterstrichen: Signifikanz größer als 90 %

Tabelle 13
Zucker im Wasser (nmol/l)

	Büsum Meßplattform 21.9.1978			Büsum Schleuse 10.4.1979			Nordsee Flex 1976 vor während Planktonblüte		Lake Baikal Nr. 4	Alster 11.8.1975*
	13.00	16.30	19.00	8.00	14.30	18.30				
Glukose	89	78	80	67	86	116	217	54	0	193
Fructose	33	381	62				62	15	230	27
Mannose	164	180	177	212	194	451	38	58	400	196
Saccharose	22	161	128	193	691	193	61	332	391	9.4
Ribose	10	8	-	tr	tr	60	-	-	62	11
Galactose	58	-	-	tr	tr	30	-	5	35	193
Maltose	133	395	286	95	156	274	9	48	192	274
Meliose	71	27	83	33	233	181	25	19	54	175
Glucose	1313	1325	1230	1043	991	1253	344	530	1780	167
Gesamt nmol/l	1893	2555	2046	1643	2351	2558	756	1061	3136	1250
Gesamt µg/l	340	460	368	296	423	460	136.5	191.7	564	225
Zucker µg/l	136	184	147	118	169	184	54.6	76.7	226	90
org mg/l	5.8	7.0	n.d.	6.1	3.2	6.7				
Zucker in % C _{org}	2.3	2.6	-	1.9	5.3	2.7				
total Karbohydr. µmol/l	3.8	3.1	n.d.							

Michaelis et al., 1976

Tabelle 14
Zucker im Wasser (%)

	Büsum Meßplattform 21.9.1978			Büsum Schleuse 10.4.1979			Nordsee Flex 1976 vor während Planktonblüte		Lake Baikal	Alster 11.8.1975*
	13.00	16.30	19.00	8.00	14.30	18.30				
amnose	4.7	3.1	3.9	4.1	3.7	4.5	28.7	5.1	-	14.6
bose	1.7	14.9	3.0				8.2	1.4	7.3	2.3
nnose	8.7	7.1	8.7	12.9	8.3	17.6	5.0	5.5	12.7	13.5
uctose	1.2	6.3	6.3	11.8	29.4	7.6	8.0	31.3	12.4	0.6
abinose	0.5	0.3	-	tr	tr	2.4	-	-	1.9	9.1
ucose	3.1	-	-	tr	tr	1.2	-	4.7	1.1	14.6
lactose	7.0	15.5	14.0	5.8	6.6	10.7	1.2	4.5	6.1	18.9
lose	3.8	1.1	4.1	2.0	9.9	7.1	3.3	1.8	1.7	14.5
ucose	69.4	51.9	60.1	63.5	42.2	48.0	45.5	50.0	56.6	11.5

Michaelis et al., 1976

EDAX-Analysen, Suspension

Mittelwerte verschiedener Serien

	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	
Büsum 21.9.78	3.86	15.59	58.12	5.11	8.44	8.88	Mittelwerte
Meßplattform (14 Proben)	0.29	0.59	1.66	0.42	0.68	1.42	Standardabweichungen
Büsum 19.10.78	4.11	16.17	57.35	4.85	8.12	9.39	Mittelwerte
Meßplattform (13 Proben)	0.52	0.79	1.32	0.21	0.62	1.18	Standardabweichungen
Büsum 10.4.79	4.62	17.99	56.05	5.22	7.12	8.99	Mittelwerte
Speicherkoogschl. (24 Proben)	0.85	1.88	2.86	0.34	0.94	1.86	Standardabweichungen
Büsum 21.6.79	8.85	18.05	55.22	4.87	6.50	6.51	Mittelwerte
Meßplattform (13 Proben)	2.82	2.31	4.48	1.42	1.70	3.04	Standardabweichungen

Tabelle 10

EDAX-Analysen an Suspensionen, Korrelation der Elemente untereinander

	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
21.9.78							
Na	1.000	<u>0.772</u>	0.033	-0.348	<u>-0.466</u>	-0.231	-0.409
Mg	<u>0.772</u>	1.000	0.312	0.193	<u>-0.594</u>	<u>-0.601</u>	<u>-0.775</u>
Al	0.033	0.312	1.000	0.343	<u>-0.590</u>	<u>-0.484</u>	<u>-0.461</u>
Si	-0.348	0.193	0.343	1.000	-0.334	<u>-0.618</u>	<u>-0.646</u>
K	<u>-0.466</u>	<u>-0.594</u>	<u>-0.590</u>	-0.334	1.000	<u>0.561</u>	<u>0.590</u>
Ca	-0.231	<u>-0.601</u>	<u>-0.484</u>	<u>-0.618</u>	<u>0.561</u>	1.000	<u>0.599</u>
Fe	-0.409	<u>-0.775</u>	<u>-0.461</u>	<u>-0.646</u>	<u>0.590</u>	<u>0.599</u>	1.000
19.10.78							
Na	1.000	<u>0.797</u>	0.420	<u>-0.735</u>	-0.246	-0.288	-0.445
Mg	<u>0.797</u>	1.000	0.365	<u>-0.775</u>	-0.302	-0.113	-0.279
Al	0.420	0.365	1.000	<u>-0.507</u>	-0.035	-0.366	-0.240
Si	<u>-0.735</u>	<u>-0.775</u>	<u>-0.507</u>	1.000	0.202	0.099	-0.100
K	-0.246	-0.302	-0.035	0.202	1.000	0.295	-0.196
Ca	-0.288	-0.113	-0.366	0.099	0.295	1.000	-0.135
Fe	-0.445	-0.279	-0.240	-0.100	-0.196	-0.135	1.000
10.4.79							
Na	1.000	<u>0.718</u>	<u>0.362</u>	<u>-0.762</u>	-0.287	-0.003	<u>-0.395</u>
Mg	<u>0.718</u>	1.000	<u>0.693</u>	<u>-0.611</u>	<u>-0.548</u>	<u>-0.363</u>	<u>-0.580</u>
Al	<u>0.362</u>	<u>0.693</u>	1.000	<u>-0.558</u>	<u>-0.514</u>	0.010	-0.320
Si	<u>-0.762</u>	<u>-0.611</u>	<u>-0.558</u>	1.000	0.160	<u>-0.377</u>	-0.082
K	-0.287	<u>-0.548</u>	<u>-0.514</u>	0.160	1.000	<u>0.413</u>	<u>0.349</u>
Ca	-0.003	<u>-0.363</u>	0.010	<u>-0.377</u>	<u>0.413</u>	1.000	<u>0.651</u>
Fe	<u>-0.395</u>	<u>-0.580</u>	-0.320	-0.082	<u>0.349</u>	<u>0.651</u>	1.000
21.6.79							
Na	1.000	<u>0.840</u>	-0.257	<u>-0.918</u>	0.317	-0.275	-0.373
Mg	<u>0.840</u>	1.000	-0.294	<u>-0.720</u>	0.145	-0.318	<u>-0.498</u>
Al	-0.257	-0.294	1.000	<u>0.511</u>	<u>-0.722</u>	<u>-0.699</u>	<u>-0.508</u>
Si	<u>-0.918</u>	<u>-0.720</u>	<u>0.511</u>	1.000	<u>-0.567</u>	-0.030	-0.004
K	0.317	0.145	<u>-0.722</u>	<u>-0.567</u>	1.000	0.446	0.448
Ca	-0.275	-0.318	<u>-0.699</u>	-0.030	0.446	1.000	<u>0.680</u>
Fe	-0.373	<u>-0.498</u>	<u>-0.508</u>	-0.004	0.448	<u>0.680</u>	1.000

Unterstrichen: Signifikanz größer als 90%

Tabelle 17 a

Strömungsgeschwindigkeiten

(Werte für 0.2 m Höhendifferenz auf 1 m Breite)

	Höhe (m)	ϕ m ²	Vol (m ³)	Zeit (min)	Ström.geschw. (m/sec)
Flut:	0		0	0	0
	0.2		84	6	1.17
	0.4		102	6	0.71
	0.6		122	10.5	0.32
	0.8		132	9	0.31
	1.0		144	12	0.20
	1.2		165	12	0.19
	1.4		216	13.5	0.19
	1.6		216	15	0.15
	1.8		216	16	0.13
	2.0		216	33	0.05
	2.1		108	48	0.02
Ebbe:	2.0		108	60	0.01
	1.8		216	36	0.05
	1.6		216	21	0.10
	1.4		216	18	0.13
	1.2		216	15	0.17
	1.0		165	15	0.15
	0.8		144	15	0.16
	0.6		132	16	0.17
	0.4		122	15	0.23
	0.2		102	15	0.28
	0		84	15	0.47

Tabelle 17 b

Netto-Transport von Suspension, C_{org} -gelöst und gelöste Zucker nach Überströmungsmodell

Zeit	m ³	Suspension		C_{org}		Zucker	
		g/m ³ *	g/ 1/2 h	g/m ³	g/ 1/2 h	nmol/m ³	nmol/ 1/2 h
2.15-12.45	440	162	71 280	13.1	5 764	5.7	2 508
2.45-13.15	410	122	50 020	5.8	2 378	3.8	1 558
3.15-13.45	440	139	61 160	9.5	4 180	3.6	1 584
3.45-14.15	252	93	23 436	5.5	1 386	3.3	831.6
4.15-14.45	108	101	10 908	5.7	616	3.7	399.6
4.45-15.15	72	64	4 608	24.1	295	3.1	223.2
Summe Flut			221 412		14 619		7 104.4
5.15-15.45	50	54	2 700	7.1	355	3.7	185
5.45-16.15	58	84	4 872	n.b. (7.1)	(412)	3.4	197.2
6.15-16.45	180	55	9 900	7.0	1 260	3.1	558
6.45-17.15	288	51	14 688	8.3	2 390	3.2	921.6
7.15-17.45	396	49	19 404	4.1	1 624	3.0	1 188
7.45-18.15	310	70	21 700	3.0	930	3.5	1 085
8.15-18.45	254	106	26 924	5.8	1 473	3.2	812.8
8.45-19.15	186	106	19 716	n.b. (5.8)	(1 079)	n.b. (3.2)	595.2
Summe Ebbe			119 904		9 523		5 542.8
Differenz in kg			101.5		5.1		1.56 mol
n % zum Flutwert			≈ 46 %		≈ 35 %		22 %
							≈ 1 050 kcal
							≈ 280 g Zucker
							≈ 112 g C
							≈ 2.2 % des C_{org}

* Suspension - 20 mg Salzhintergrund
 n.b. = nicht bestimmt